

**Entwicklung, Durchführung und Bewertung einer Methodik der  
Energieeffizienzmessung für eine vollhydraulische  
Spritzgießmaschine in der Kunststoffindustrie**

**D I S S E R T A T I O N**

**zur Erlangung des akademischen Grades**

**Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr. -Ing.)**

**vorgelegt von**

**Dipl. -Ing. Dipl. -Wirtsch. -Ing. Niels Vormoor**

**aus Vechta**

**genehmigt von der Fakultät für Energie und Wirtschaftswissenschaften**

**der Technischen Universität Clausthal**

**Tag der mündlichen Prüfung**

**15.08.2017**

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

**Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek**

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Dekan:	Prof. Dr. rar. nat. habil. B. Lehmann
Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr. rer. nat. habil. H.-J. Gursky
Hauptberichterstatte:	Prof. Dr. -Ing. R. Weber
Mitberichterstatte:	Prof. Dr. -Ing. O. Carlowitz

Dissertation Technische Universität Clausthal 2017

**D 104**

© **PAPIERFLIEGER VERLAG** GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2017  
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld  
[www.papierflieger.eu](http://www.papierflieger.eu)

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2017

**ISBN 978-3-86948-603-1**

## Vorwort

Meine Promotionsstellensuche führte mich während meiner Aushilfstätigkeit zum ehemaligen Geschäftsführer Herrn Friedrich Kühling, dem ich mein Vorhaben berichtete. Gemeinsam mit seinem Kollegen aus der Geschäftsführung Herr Norbert Nobbe und seiner Kollegin Frau Hannelore Rudloff wurde das Vorhaben (diese Dissertation zu erstellen) angegangen. Somit wurde erstmals ein Doktorandenthema in der Firma Pöppelmann formuliert. Mit Herrn Michael Völker (Leiter der Elektroabteilung) und Herrn Josef Medeweller (stellv. Leiter der Elektroabteilung) wurde ein Thema formuliert und die Recherche zu diesem Thema begann. Den Anfang dieser Idee stellte ich anschließend Herrn Prof. Weber bei der TU-Clausthal vor.

Der Firma Pöppelmann liegt die Idee der Effizienzmessung sehr am Herzen. Maschineninterne effizienzbezogene Daten sind Eigentum des Herstellers und werden nicht direkt an den Maschinenkäufer abgegeben. Somit musste eine Methodik erarbeitet werden, die Energieströme einer Maschine zu ermitteln und bei Parameteränderung die erhofften unterschiedlichen Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Dabei stehen diese Ergebnisse selbst und deren Verifizierung im Vordergrund. Die Ursache für den genauen Wert eines Ergebnisses wird nur oberflächlich nebenher betrachtet.

Bedanken möchte ich mich für die kontinuierliche Betreuung bei der Universität Clausthal. Herr Prof. Dr. -Ing. Weber stand stets für aufschlussreiche und informative Gespräche zur Verfügung und erleichterte mir durch die Einsichtnahme in meine Laboreinrichtung und die anschließende Diskussion die Fertigstellung dieser Dissertation sowie bei Frau Dr.-Ing. Schaffel Mancini. Sie hat den Kontakt zur TU Clausthal zu Anfang hergestellt. Ich bedanke ich mich sehr bei meinen Eltern für die finanzielle Unterstützung während meines gesamten Studiums in Wilhelmshaven und Clausthal.

In der Firma geht mein Dank an Herrn Friedrich Kühling, Herrn Norbert Nobbe und Frau Hannelore Rudloff, welche meine Idee der Promotion für die Firma Pöppelmann angenommen haben. Bei Herrn Michael Völker, Herrn Reinhold Freude (Abteilungsleiter Instandhaltung), Herrn Antonius Hartke (stellv. Leiter Instandhaltung) und Herrn Michael Grewing (M. Sc.) bedanke ich mich für die fachliche Unterstützung zur Themenauswahl und den weiteren Verlauf der Dissertation. Bei Herrn Dipl.-Ing. Torsten Ratzmann (Vors. der Geschäftsführung) bedanke ich mich für die fachliche Unterstützung und die Genehmigung der Fortsetzung dieses Themas.

Für den EDV-Support geht der Dank an Herrn Johannes Oevermann (B. Ing.) und Herrn Lars Heseding (staatl. gepr. Techniker). Besonderer Dank geht an Herrn Josef Medeweller für die aufwändige kontinuierliche technische Unterstützung.

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	11
Abstract .....	12
Declaration .....	13
1. Einleitung, Problemstellung und Zieldefinition .....	14
1.1 Notwendigkeit effizienzsteigerender Maßnahmen.....	14
1.2 Generelle Problemstellung der Energiebeschaffung und Bereitstellung.....	14
1.3 Anforderungsspezifikation an theoretische und praktische Lösungskonzepte .....	14
2. Theoretische Grundlagen .....	15
2.1 Einleitung und Zielsetzung .....	15
2.2 Zustandsgrößen der Thermodynamik .....	18
2.3 Thermodynamische Systeme .....	19
2.4 Energietransport im Bereich der Wärmeübertragung: Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung ....	21
2.5 Elektrotechnik.....	25
2.5.1 Wechselstromnetze und übertragene Leistung.....	25
2.5.2 Blindstromkompensation .....	25
2.5.3 Effizienzklassen elektrischer Maschinen .....	27
2.6 Prozesskühlverfahren und –anlagen .....	29
2.7 Last- und Energiemanagement in der Industrie.....	30
2.8 Problemstellung des Energiemanagements im betrachteten Unternehmen.....	33
2.8.1 Generelles energiepolitisches Konzept .....	33
2.8.2 Verwendete praktische Lösungskonzepte .....	35
2.8.3 Ansätze zur Effizienzsteigerung.....	37
2.8.4 Schlussfolgerung und Zieldefinition .....	38
3. Spritzgießmaschinen: Grundlagen und Energiebilanzierung .....	39
3.1 Spritzgießmaschine .....	39
3.2 Spritzgießprozess und Prozessparameter .....	40
3.3 Energiebilanzierung: Betrachtung elektrischer Energiezufuhr .....	45
3.4 Energiebilanzierung: Betrachtung der Formänderung im Prozess.....	46
3.5 Energiebilanzierung: Bilanz formbestimmender Prozessschritte .....	47
3.5.1 Berechnung der Plastifizierarbeit.....	48
3.5.2 Berechnung der Einspritzarbeit.....	49
3.5.3 Analyse der Energiebilanz beim Spritzgießen .....	49
3.6 Wärmeübertragungsmechanismen im Werkzeug .....	51



3.6.1 Aufbau der Werkzeugtemperierung .....	51
3.6.2 Kühlkanäle, Kühlmedium und Durchfluss im Werkzeug .....	52
4. Analyse des Istzustandes im betrachteten Unternehmen zur Schaffung einer Datenbasis .....	57
4.1 Einleitung.....	57
4.2 Datenaufnahme, Zahlen aus der ABC-Analyse und Energiereport .....	58
4.3 Stand der Technik und bisherige Erkenntnisse aus Diplomarbeiten.....	60
4.4 Herstellung mit hohem Qualitätsstandard durch Qualitätsmodell.....	64
4.5 Maschinenfähigkeitsuntersuchung .....	66
5. Die Prüfung von mathematischen Berechnungsmethoden zur Auswertung von Messwerten....	70
5.1 Berechnung der Funktionswerte anhand von Stützstellen .....	70
5.2 Auswahl der Methodik für den weiteren Verlauf der Arbeit .....	71
5.3 Praktische Umsetzung des ausgewählten mathematischen Verfahrens .....	72
5.4 Zusammenfassung über die Prüfungsmethodik.....	73
6. Versuchsreihen -Vorbereitung und -Durchführung .....	74
6.1 Der Versuchsaufbau .....	74
6.2 Einleitung zur Entwicklung und Auswahl eines Messsystems.....	75
6.3 Vergleich von zwei Datenauswertungssystemen.....	76
6.3.1 Das DASyLab Auswertesystem .....	76
6.3.2 Das Beckhoff Auswertesystem .....	78
6.3.3 Bewertung der beiden Messsysteme .....	79
6.3.4 Ausprägungszuordnung je Lösung .....	81
6.3.5 Gegenüberstellung der Kriterien.....	81
6.3.6 Ergebnistabelle, Nutzwertberechnung .....	82
6.4 Die Parameter als Stellschrauben .....	82
6.5 Der Laboraufbau.....	84
6.5.1 Aufbau des Versuchsraumes .....	84
6.5.2 Aufbau der Maschine .....	86
6.5.3 Aufbau der Messeinrichtung, Sensorik an der Maschine.....	87
6.5.4 Aufbau der Messeinrichtung, Datenaufnahmesystem .....	88
6.5.5 Kalibrierung des Hydrauliköl-Durchflusssystems .....	89
6.5.6 Kalibrierung der Absaugvorrichtung (Luftvolumenstrommessung).....	90
6.5.7 Kalibrierung der Weggeber (Einspritzweg) .....	91
6.6 Durchführung der Versuchsreihen, Vorversuche.....	93
6.6.1 Versuchsreihe 1: Energiegrößen bestimmen, Energiebilanz aufstellen für den Messraum ....	93

6.6.2 Versuchsreihe 2: Bestimmung der Antriebsgrößen im Leerlauf .....	94
6.6.3 Versuchsreihe 3: Prozessbilanz zweier formbestimmender Prozessschritte (Einspritzen und Plastifizieren) .....	96
6.6.4 Versuchsreihe 4: Splittung des Antriebs zur Vervollständigung der Energiebilanz .....	100
6.6.4 Zusammenfassung zu den Versuchen .....	103
7. Modellbildung (aus den o.g. vorgestellten Versuchsthemen) .....	104
7.1. Vorbereitung Prozessmodelle: Matrix über vorliegende Energieprozesse und deren Prozessparameter .....	104
7.2. Selektion und Auswahl der Prozessparameter: Verfremdungsmöglichkeiten für effizienzsteigernde Maßnahmen.....	105
7.3. Einführung der Analysemethodik für energietechnische Prozessmodelle .....	107
7.3.1. Lösungsmodelle zur Erfassung von Energieströme .....	107
7.3.2. Erstellung eines Pflichtenheftes für die Analysemethodik.....	108
Aufgabenstellung/Konstruktion der Software .....	108
Beckhoff SCOPE VIEW, Produktionsprozess elektrische Leistung.....	108
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Bilanzrechnung .....	109
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Stromzähler für SIEMENS PAC Messgerät .....	110
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Wärmemengenzähler hochauflösend .....	110
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, kumulierte Leistungsmessung .....	111
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Arbeit in kWh).....	112
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Leistung in kW) .....	113
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Einspritzen in kWh) .....	114
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Plastifizieren in kWh) .....	115
Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Temperatur-/Druckübersicht .....	116
Beckhoff TWIN-CAT, Kalibrierungsübersicht, Einstellungen der Sensoren.....	117
7.4. Bewertung der automatisierten Aufnahmemöglichkeiten von Energieumwandlungsprozessen.....	117
7.5. Zusammenfassung über mögliche Automatisierungsmethoden .....	119
8. Untersuchung und Prozessaufnahme .....	120
8.1. Einführung in die Versuche .....	120
8.2. Vorbereitung der Labormaschine.....	121
8.2.1 Vorbereitung der Datenerfassung.....	121
8.2.2 Vorbereitung Monitoring .....	122
8.2.3 Nach-Kalibrierung Öl-Durchflussmessung und Luftstrommessung .....	124
8.2.4 Abgleich Temperaturfühler .....	124

8.3.	Ermittlung Grundzustand, Prozessaufnahme .....	125
8.4.	Parameteränderungen .....	126
8.4.1.	Shell Tellus S2 Änderung der Öltemperatur .....	126
8.4.2.	Shell Tellus S2 Änderung der Heiztemperatur .....	126
8.4.3.	Shell Tellus S2 Änderung der Heizungsisolierung .....	127
8.4.4.	Änderung auf S4 Änderung der Öltemperatur .....	127
8.4.5.	Änderung auf DTE10 Excel, Änderung der Öltemperatur .....	128
8.5	Einstellgrößen der Maschine Parameterveränderungen und Auswirkungen auf den elektrischen Energieverbrauch.....	129
8.5.1	Veränderung der Kühlzeit.....	129
8.5.2	Veränderung des Schließdrucks .....	130
8.6	Veränderung des Durchflusses der Flansch Kühlung und Auswirkung auf den thermischen Energieverbrauch .....	131
8.7.	Zusammenfassung der Versuchsdurchführung.....	132
9.	Ergebnisse der Prozessaufnahme.....	133
9.1.	Grundzustand .....	133
9.1.1.	Ergebnis des Grundzustandes mit PPH9020 .....	133
9.1.2.	Änderung von Material PPH9020 auf PE1800H .....	134
9.2.	Parameteränderungen .....	136
9.2.1.	Änderung der Heizungsisolierung .....	136
9.2.2.	Änderung der Heizungstemperatur, Leistungen Raum.....	136
9.2.3.	Änderung der Heizungstemperatur, Einspritz- und Plastifizierarbeit .....	137
9.2.4.	Shell Tellus S2 Änderung der Heiztemperatur nach Spülung (Wiederholversuch) .....	139
9.2.5.	Shell Tellus S2 Änderung der Öltemperatur .....	139
9.2.6.	Änderung auf Shell S4, Raumbilanz.....	141
9.2.7.	Shell S4, Änderung der Öltemperatur .....	141
9.2.8.	Änderung auf Mobil DTE10 Excel, Raumbilanz .....	143
9.2.9.	Mobil DTE10 Excel, Änderung der Öltemperatur.....	143
9.2.10.	Übersicht, Einspritzarbeit und Plastifizierarbeit bei unterschiedlichen Ölen .....	145
9.3	Einstellgrößen der Maschine Parameterveränderungen und Auswirkungen auf den elektrischen Energieverbrauch.....	147
9.3.1	Veränderung der Kühlzeit.....	147
9.3.2	Veränderung des Zuhaltekraft .....	148
9.4	Veränderung des Durchflusses der Formkühlung und Auswirkung auf den thermischen Energieverbrauch .....	149

9.5 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	150
10 Diskussion der Ergebnisse .....	151
10.1 Veränderungen im Grundzustand .....	151
10.1.1 Auswirkungen von Heizungstemperaturänderung .....	151
10.1.2 Auswirkungen von Öltemperaturänderung .....	154
10.1.3 Auswirkungen von Materialtausch .....	158
10.2 Abweichungen, Maßnahmen zur Energieeinsparung .....	162
10.2.1 Auswirkungen der Heizungsisolierung .....	162
10.2.2 Auswirkungen von Öltausch mit Shell S4 .....	163
10.2.3 Auswirkungen von Öltausch zu Mobil DTE10 EXCEL .....	167
10.3 Betrachtung der ergänzenden Versuche .....	170
10.3.1 Zusammenhang von Schließkraft und Leistungsspitzen .....	170
10.3.2 Zusammenhang zwischen Kühlzeit, mittlerer Leistung und $\cos\varphi$ .....	172
10.3.3 Auswirkung der Durchflussänderung in der Form auf die abgegebene Kühlleistung .....	174
10.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der automatischen Analyse zur manuellen Parametererfassung .....	175
10.5 Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse .....	179
10.5.1 Überprüfung der Deckungsanteile Raumbilanz .....	179
10.5.2 Überprüfung der Deckungsanteile Einspritzen und Plastifizieren .....	179
10.5.3 Überprüfung der Deckungsanteile Einspritzen und Plastifizieren .....	180
10.5.4 Abschließende Verifizierung für die Energieeinsparung der neuen Öle: .....	182
10.5.5 Einschätzung der Messfehler .....	182
10.6 Zusammenfassung der Ursachen und Bewertungsmethodik .....	183
11 Nutzbarkeit der Ergebnisse, Erkenntnisse und Ausblick .....	185
11.1 Maschinenfähigkeit: Zufriedenstellende Produktqualität gewährleistet? .....	185
11.2 Einführung eines Beispiels zur Durchflussreduzierung im Werkzeug als Anwendungsmethodik und –Nützlichkeit .....	187
11.3 Zeiteinsparung mit automatisierter Messmethodik .....	190
11.4 Verwendbarkeit der Ergebnisse der Dissertation .....	192
11.5 Ausblick auf neue Themen .....	193
12. Fazit .....	194
13. Anhang .....	195
13.1 Glossar .....	195
13.2 Hydraulikplan Spritzgießmaschine .....	201
13.3 Zubehör: Messparameter und Messgeräte für die Laboreinrichtung .....	202

13.4 Versuchsreihen: Verifizierung Plastifizierarbeit .....	203
13.4.1 Versuchsreihen: Verifizierung SCILAB Interpolation .....	204
13.4.2 Versuchsreihen: Verifizierung SCILAB Numerische Integration .....	204
13.5 Kalibrierung Versuchseinrichtung .....	205
13.5.1 Kalibrierung der Schneckendrehzahl Dosiermotor .....	205
13.5.2 Kalibrierungstabelle Turbinen (Abgleich in Reihenschaltung) .....	205
13.5.3 Kalibrierung, Luftvolumenstrommessung .....	207
13.6 Daten aus Leerlaufmessung aller drei Ölsorten .....	208
13.7 Sankey Diagramme .....	209
13.7.1 Sankey Raumbilanz: Laborraum .....	209
13.7.2 Sankey Prozessbilanz: Einspritzen .....	210
13.7.3 Sankey Prozessbilanz: Plastifizieren .....	211
13.8 Parametertabelle Raumleistungen Diskussion.....	212
13.9 Parametertabelle Einspritzen .....	214
13.10 Parametertabelle Plastifizieren .....	216
13.11 Diskussion: Abweichungsanalyse, Übersichtstabelle Raumbilanz .....	218
13.12 Diskussion: Abweichungsanalyse, Übersichtstabelle Einspritzen .....	220
13.13 Diskussion: Abweichungsanalyse, Übersichtstabelle Plastifizieren .....	222
13.14 Maschinenfähigkeitsuntersuchung .....	224
13.15 Zeitaufnahmen .....	226
13.15.1 Zeitaufnahme, manueller Messprozess .....	226
13.15.2 Zeitaufnahme, automatisierter Messprozess .....	227
13.15.3 Statistische Absicherung, manueller Prozess .....	228
13.15.4 Statistische Absicherung, automatisierter Prozess .....	229
13.15.5 Planung und Durchführung der Zeitaufnahmen .....	230
13.15.6 Begriffe und Erklärungen.....	230
13.15.7 Ablauf einer Zeitaufnahme.....	232
13.15.8 Begriffe und Erklärungen.....	233
13.15.9 Verfahren zur Auswertung der Zeitaufnahmen .....	234
13.16 Messprotokoll Durchflussreduzierung, Übersichtstabelle .....	235
13.17 Wärmeübertragung ins Erdreich nach DIN EN ISO 13370 .....	236
13.18 Programmtexte, automatisierte Leistungsmessung .....	236
13.18.1 Programmtexte, Auszug Stromzähler .....	236
13.18.2 Programmtexte, Auszug Wärmemengenzähler .....	237

13.18.3 Programmtexte, Auszug Wärmemengenzähler .....	237
13.19 Diagramm: Zusammenhang der elektrischen Leistung, Hydraulikdruck und Leistungsfaktor Cosp.....	238
13.20 Zykluszeiten mit unterschiedlichen Ölen .....	238
Abbildungsverzeichnis.....	239
Tabellenverzeichnis .....	243
Abkürzungsverzeichnis .....	245
Literaturverzeichnis.....	246
Internetquellen.....	253

## **Zusammenfassung**

In der Dissertation wird eine automatische Energieeffizienzmessung an einer vollhydraulischen Arburg Kunststoff-Spritzgießmaschine beschrieben. Mit der Aufstellung einer Raumbilanz wird ein Produktionsprozess energietechnisch in seine Bilanzkomponenten von den Eingangs- zu den Ausgangsgrößen erfasst und durch das Spezifizieren zweier formbestimmender Teilprozesse werden Energieströme erkannt, die bisher in der Forschung so noch nicht ausführlich analysiert wurden. Durch diese daraus entstehenden Prozessbilanzen lassen sich die Energiewerte der Raumbilanzen auf den eigentlichen Antrieb der Spritzgießmaschine zurückführen.

Die Analyse der formbestimmenden Prozesse Einspritzen und Plastifizieren folgt in Form von Energieströmen. Diese werden über die Komponenten der elektrischen Antriebsarbeit, über die Förderarbeit und Wärmearbeit der Regel- und Haltepumpe bis zu den Leckölmärmeströmen (ebenfalls in Form von Arbeit) analysiert. Die Aufspaltung wurde in der Wissenschaft in dieser Form noch nicht durchgeführt. Die Bilanz wird erfolgreich geschlossen.

Es wird außerdem die Gewinnung von möglichen Einsparpotentialen untersucht: Die Isolierung der Heizung, die Verwendung zwei verschiedener Öle von unterschiedlichen Herstellern, von denen eine Energieeinsparung versprochen wird. Außerdem wird auch eine Änderung verschiedener Maschineneinstellungen ausführlich untersucht. Es stellt sich heraus, dass die Isolierung der Heizung eine Veränderung in der Raumbilanz hervorruft. Die elektrische Leistung sinkt bei dieser Maschine um 10% (ausgehend von der Heizleistung selbst) und die Raumlüftungsleistung an der Bilanzausgangsseite sinkt ebenfalls um diesen Betrag. Bei der Verwendung der zwei verschiedenen Öle liefern beide Versuchsreihen ähnliche Ergebnisse. Durch den Einsatz dieser Öle verringert sich die Antriebsleistung, also der gesamte Input, um zwei bis drei Prozent. Die Leistungs- und Arbeitswerte verhalten sich bis 50°C weitgehend stabil. Die Leckölströme sind sogar bei dem Einsatz der neuen Öle um ca. 30% gesunken. Dieses wird anhand einer manuellen Volumenstrommessung bestätigt.

Die Veränderung der Leistungsspitzen und der Eingriff in Prozesszeiten bilden den Abschluss der Arbeit im Versuchsteil. Durch die Verringerung der Schließkraft des Werkzeugs auf die Hälfte des Ursprungswertes werden die Leistungsspitzen um ca. 25% gesenkt. Die Ausbringungsmenge der Maschine kann durch eine Verringerung der Kühlzeit um ca. 15% gesteigert werden. Während dieser Versuchsreihen wird eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung der produzierenden Teile durchgeführt. Die Maschinenfähigkeitsuntersuchung im letzten Kapitel der Dissertation beschreibt ein Verfahren, die Produkte, welche im Laufe der vorhergehenden Versuche während der Effizienzsteigerung produziert werden, zu prüfen. Der Wert zeigt Maschinenfähigkeit und legt die Standardnormalverteilung als statistische Auswertungsmöglichkeit zu Grunde.

## Abstract

The dissertation describes an automatic energy efficiency measurement of a fully hydraulic Arburg plastic injection molding machine. With the drawing of an energy balance, a production process is recorded from the input to the output variables in terms of energy technology, and by specifying two important subprocesses, energy flows are identified that have not yet been analyzed extensively in research. As a result of these process balances, the energy values of the room balances can be reduced to the actual drive system of the injection molding machine.

The analysis of the form particularized processes of injecting and plasticizing is described in the form of energy streams. These are analyzed with the components of the electrical drive work, the transfer work and the heat of the control and holding pump up to the leak oil heat flows (also in the form of work). This splitting up has not been carried out yet in science in this form. The energy balance is closed successfully.

However, feasible cost saving potentials are also investigated: The insulation of the heating system, the use of two different oils from different manufacturers, who promise energy saving by using these oils. In addition, a modification of different machine settings is also extensively examined. The results are that the isolation of the heating causes a change in the room energy balance. The electrical power draw for this machine decreases by 10% (keeping the heat requirements of the same level) and the room ventilation output on the balance output also decreases by this amount. When using the two different oils, the two series of experiments give similar results. The use of these oils reduces the drive power and of course the total input, by two to three percent. The performance and operating values are almost stable up to 50°C. The leakage oil flows have decreased by about 30% even with the use of the new oils. This is confirmed by a manual volumetric flow measurement.

The change in the power peaks and interference to processing durations completes the work in the experimental part. By reducing the closing force of the tool to the half of the original value, the power peaks are reduced by approximately 25%. The output quantity of the machine can be increased by approx. 15% by reducing the cooling time. During these test series, continuous quality monitoring of the manufacturing parts is carried out. The machine capability study in the last chapter of the dissertation describes a procedure to test the products produced during the improvement of efficiency. The value shows process capability and determines the standard normal distribution as a statistical evaluation option.



## **Declaration**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die bei der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Clausthal eingereichte Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Die benutzten Hilfsmittel sind vollständig abgegeben.

Niels Vormoor

# **1. Einleitung, Problemstellung und Zieldefinition**

## **1.1 Notwendigkeit effizienzsteigerender Maßnahmen**

Die Dissertation beschäftigt sich mit der Frage nach Energieeinsparmaßnahmen zur Effizienzsteigerung von Energieversorgungsprozessen und deren davon abhängigen Fertigungsprozessen. Die Verknappung der Energieressourcen und der Rückgang der Kernenergie führen zu höheren Energiepreisen. Der Konkurrenzkampf von Unternehmen führt zur Anpassung und flexiblerer Gestaltung von Produktionsprozessen. Die Energie muss demnach zu unterschiedlichen Zeitpunkten in effizienter Weise bereitgestellt werden.

## **1.2 Generelle Problemstellung der Energiebeschaffung und Bereitstellung**

Die generelle Problemstellung der sicheren Energieversorgung soll bei dieser Arbeit im Hintergrund stehen. Methoden der sinnvollen Energienutzung und der dadurch steigenden Effizienz sind die Gründe für die in dieser Dissertation folgenden Untersuchungen. Unternehmen verhandeln mit unterschiedlichen Energieanbietern auf liberalisierenden Märkten einen Strompreis, der nicht auf Dauer gehalten werden kann, da die Energieversorgungsunternehmen sich dem Markt anpassen und wegen der Verknappung der Energie ihre Preise anheben müssen. Eine Möglichkeit der Kostenreduzierung stellt ein effizienter Energieeinkauf dar. Ist die Abnahmemenge gleich, bestehen zum Teil Preisunterschiede, die sehr weit auseinandergehen, auch lassen sich deutliche Kosteneinsparungen durch Energieträgerwechsel realisieren.

Die Steuern und auch die Umlagen haben einen immer größer werdenden Anteil am Strompreis. Der Strompreis in KWh setzt sich zusammen aus Netznutzungsentgelt und Konzessionsabgabe, der EEG- und KWK-Umlage, dem Arbeitspreis und der Stromsteuer. „Seit 2013 ist die Haftungsbegrenzung der Netzanbindung von Offshore-Windanlagen[...]“ [70] als eine weitere Umlage hinzugekommen.

## **1.3 Anforderungsspezifikation an theoretische und praktische Lösungskonzepte**

Theoretische und praktische Lösungskonzepte sollen die Stromkosten verringern oder bei steigendem Umfang elektrischer Anlagen auch gering halten. Die Kosten entstehen nicht nur bei leistungspreisabhängigen Stromverträgen für die bezogene Wirkarbeit, sondern für die Leistungsspitze mit dem höchsten Abnahmewert. Werden die Leistungsspitzen abgesenkt, können

die Stromkosten deutlich reduziert werden. Diese Möglichkeit der Strommessung und Stromauswertung wird unter dem Begriff Lastganganalyse zusammengefasst.

## 2. Theoretische Grundlagen

Werden die Lösungskonzepte in der Literatur betrachtet, kann generell folgende Aussage getroffen werden, dass in den Konzepten der Energieeinsparungen auf dem Gebiet der Thermodynamik und in der Energieeinsparung auf dem Gebiet der Elektrotechnik unterschieden werden kann. Aufgezeigt werden Modelle einzelner Energieanlagen und technische Zusammenhänge, jedoch kein Energiesystem an sich, welches zur Energieeinsparung führt. Die Zusammenhänge der Energieeinsparungsmöglichkeiten sollen Bestandteil des nächsten Punktes „Last- und Energiemanagement in der Industrie“ sein.

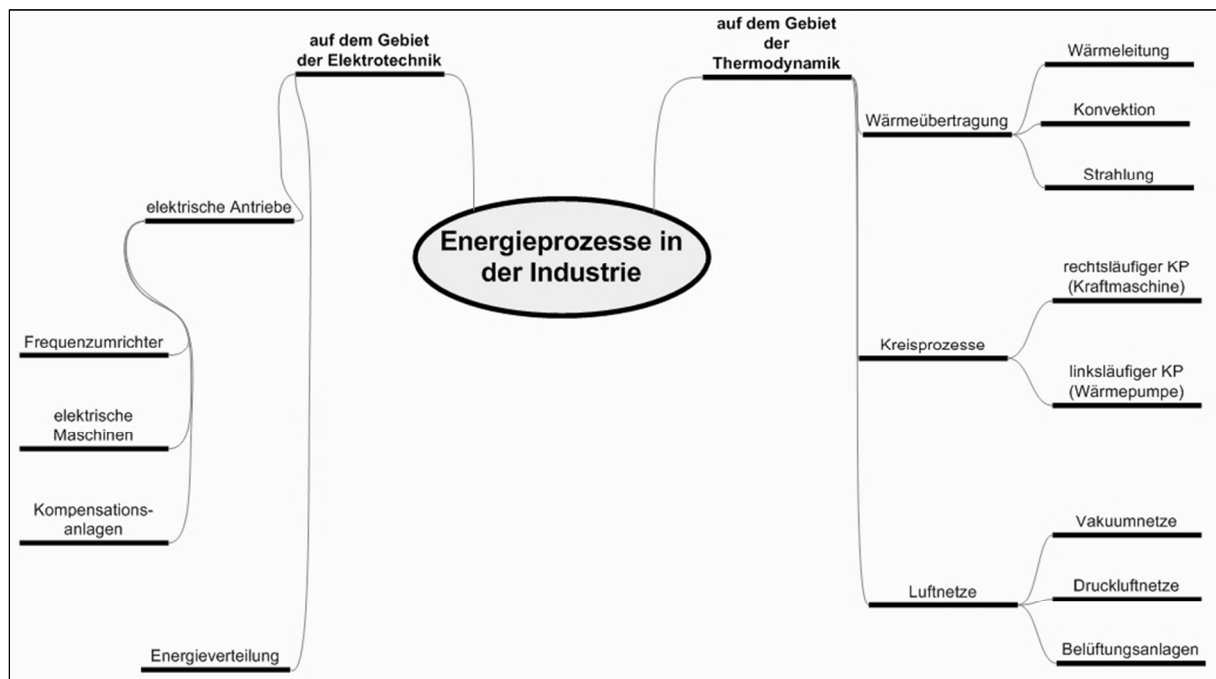


Abbildung 1: Übersicht über die Energieprozesse

Um Energieeinsparungen in dieser Dissertation betrachten und bewerten zu können, ist es erforderlich den Begriff „Energie“ zum einen in der Thermodynamik und zum anderen in der Elektrotechnik zu definieren. Die Arbeit befasst sich vor allem mit der energetischen Analyse des Spritzgießens. Deshalb wird nun vorab auf das Verfahren eingegangen.

### 2.1 Einleitung und Zielsetzung

Kunststoffteile werden in vielen Bereichen des Lebens verwendet und ohne sie wäre das tägliche Leben nicht möglich. Die Kunststoffindustrie ist auf Grund der möglichen Produktionskapazitäten in

den Niedriglohnländern ständig gezwungen ihre Produktionsprozesse anzupassen. Der Kunde möchte über die Qualität des Produktes bestimmen und hat inzwischen auch schon Einfluss auf den Herstellungsprozess an sich, das Material und die Entwicklung und Rüstverfahren von Maschinenanlagen. Nur durch eine Kooperation mit Hersteller und Kunde kommt ein Auftrag zustande. In der Kunststoffindustrie sind etwa 60% aller verarbeitenden Maschinen auf die Spritzgießtechnologie ausgerichtet. In Deutschland decken Kunststoffe ca. 25% [50] des Gesamtverbrauchs. Neben der flexiblen Gestaltung des Spritzgießprozesses werden durch die Gegenstücke, d.h. die Formen und Werkzeuge, die Geometrien frei bestimmt. Der Markt drängt zu einer immer wiederkehrenden Modernisierung eines Istzustandes. Der Punkt Prozessfähigkeit durch keine oder nur geringe Abweichungen von der Sollgröße zwingt zu immer genaueren Spritzgießtechniken und schließlich zur Voll-Automatisierung mit Produktfehlererkennung. Es müssen demnach die vollhydraulischen, die elektromechanischen oder gar vollelektrischen Maschinen gegenübergestellt werden [57]. Der Punkt Prozessfähigkeit [7] und die nur gering oder gar nicht zulässige Abweichung von der Sollgröße zwingt zu einer möglichst exakten Wiederholgenauigkeit im Produktionsprozess, nur so kann eine gute Produktqualität und dadurch die Kundenbindung erhalten werden [6, 35, 60].

Leider spielt nicht nur die Produktqualität in der Kunststoffbranche eine Rolle. Der Preis für ein Produkt, und damit zum einen die Ausbringungsmenge je Stück einer Maschine, das Material und der Energieverbrauch pro Stück muss für eine Preiskalkulation betrachtet werden.

Der erste Punkt der Ausbringungsmenge erfordert größtenteils eine exakte Abstimmung der Prozessparameter „Geschwindigkeit des Einspritzens“, „Dosiervolumen“ und der Nebenzeiten wie „Kühlzeit“, „Werkzeugöffnungs-/Schließgeschwindigkeit“.

Zum Punkt Materialeinsatz ist die Veränderung der o.g. Prozessparameter zu beachten. Einspritzgeschwindigkeit und Dosiervolumen können sich durch unterschiedliche Dichte und Fließzahl des Materials ändern.<sup>1</sup> Die Änderung des Materials bestimmt in der heutigen Zeit der Kunde, dem Hersteller bleibt es nur offen den Prozess eines Spritzgießteils zu formen und die notwendigen Einstellparameter der Maschine anzupassen. Ein Materialwechsel verursacht eine Veränderung der Energiewerte. Dieses haben beispielsweise Studienarbeiten [28] im Vorfeld dieser Dissertation bewiesen.

Das Thema Energieverbrauch rückt durch den Materialwechsel für ein Produkt, durch eine notwendige Parameteränderung im Prozess und durch das Anteigen der Energiepreise in den Fokus

---

<sup>1</sup> wird in der Diskussion auf Seite 161 erläutert

der Unternehmen. Bisherige Untersuchungen, auch in anderen Dissertationen, befassten sich immer mit dem Formgebungsprozess beim Spritzgießen [7, 17, 21, 24]. Es wird eine Energiebilanz aufgestellt, welche den Spritzgießprozess des Formgebungsprozesses darstellt. Enthalten sind die eintretende Energie in Form von Einspritzarbeit oder Plastifizierarbeit, sowie der Wärmestrom enthalten in der Masse des festen Granulats, welches zum Austritt als flüssige Masse transportiert wird. Diese verlässt mit einer Wärmeenergie und einem Druck das System. Nebenbei werden die Komponenten der Umwelteinflüsse durch Abgänge der Wärmeströme verschiedener Energieformen dargestellt. Darin enthalten sind z.B. die Strahlung an die Umgebung und Flüssigkeitskühlung, welche durch Konvektion das Maschinen- und Forms system kühlt.<sup>2</sup> Zusätzlich wird Heizenergie in das System auf elektrischem Wege eingebracht.

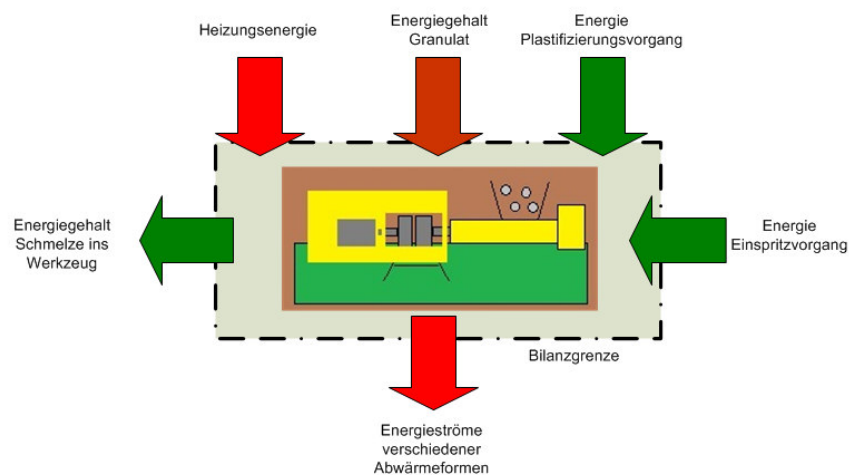


Abbildung 2: Energiebilanz einer Spritzeinheit (ohne Werkzeug)

Diese Bilanz wird in vielen Dissertationen [s.o.] zwar aufgestellt, jedoch muss bemängelt werden, dass sich anschließend in den meisten Arbeiten nur der Fokus auf das Thema elektrische Energie am eigentlichen Input des Systems gesetzt wird. Es wird für das Spritzgießverfahren elektrische Energie benötigt, dabei spielt die Antriebsart der Maschine keine Rolle. Die Frage, welche in dieser Dissertation zu Beginn gestellt wird, ist, wo diese Energie – neben dem in Abb.2 genannten Formgebungssystem – in einem Antriebssystem hingeht. Aufgabe der Arbeit ist es Leistungs- und Arbeitswerte eines hydraulischen Systems methodisch am Beispiel einer vollhydraulischen Maschine zu ermitteln um diese mit den Eingangsgrößen Einspritz- und Plastifizierarbeit in Beziehung setzen zu können. **Ein Thema „mit der Betrachtung eines hydraulischen Zwei-Pumpen-Antriebes der Spritzgießmaschine“ wurde bisher meiner Meinung NOCH NICHT in einer Dissertation oder Forschungsberichten behandelt.** Es ist eine Betrachtung vorzunehmen, welche von einer allumfassenden Raumbilanz (einem Raum als Systemgrenze) mit ihren Zu- und Abgängen der

<sup>2</sup> Die Verfahren werden im Teil der Grundlagen 3.6 auf S.51 beschrieben

Energieströme verschiedenster Art heruntergebrochen wird, auf das hydraulische Antriebssystem mit der Antriebsmaschine (Asynchronmotor) über das Hydraulikpumpensystem bis hin zu den Bewegungskomponenten Hydraulikzylinder und Dosiermotor.

Die Abgrenzung liegt dabei im Detailgrad der Betrachtung. Es wird nach der Ermittlung der einzelnen Kenngrößen des Einspritz- und Plastifiziervorgangs für diese Arbeit abgeschlossen. Die Ermittlung bezieht sich exemplarisch auf ein solches Modell der vollhydraulischen Maschine, welche in der Kunststoffindustrie generell sehr oft im Einsatz ist. Für andere Maschinentypen soll das in dieser Arbeit entwickelte Mess- und Analysemodell als Beispiel dienen und ist dementsprechend anzupassen.

Ziel der Versuche ist es generell die Bilanz nach Erstellung eines Messsystems positiv zu beeinflussen, den Energieverbrauch der Maschine an beiden Seiten der Bilanz sichtbar zu machen und schließlich durch Parameterveränderung zu reduzieren.

## 2.2 Zustandsgrößen der Thermodynamik

„[...]In der Thermodynamik bezeichnet man Energie, welche die Grenze eines Systems überschreitet, dann als Wärme, wenn der Energietransport allein durch einen Temperaturunterschied zwischen dem System und seiner Umgebung bewirkt wird“ [2].

Zum Begriff der Massenerhaltung gehört die Kontinuitätsgleichung mit den Größen  $A$  (Querschnittsfläche),  $\omega$  (Geschwindigkeit in m/s) und  $\rho$  (Dichte in kg/m<sup>3</sup>).  $\dot{m}$  steht für den Massestrom in kg/s. Werden Querschnittsfläche und Dichte zusammengefasst, entsteht daraus der Volumenstrom. Mit diesen Größen kann die Kontinuitätsgleichung beschrieben werden:

$$\dot{m} = A \cdot \omega \cdot \rho \quad (1.0)$$

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (1.1)$$

Die unten abgebildete Massenbilanz beschreibt die eingehenden Massen, Volumen und Teilchenströme über die Systemgrenze in das System hinein und über die Systemgrenze wieder aus dem System heraus. Finden stattdessen keine Massenänderungen statt, wird von einem stationären System gesprochen. Instationäre Systeme beinhalten eine Änderung der Ströme von ihrem Eintritt zum Austritt aus dem System.

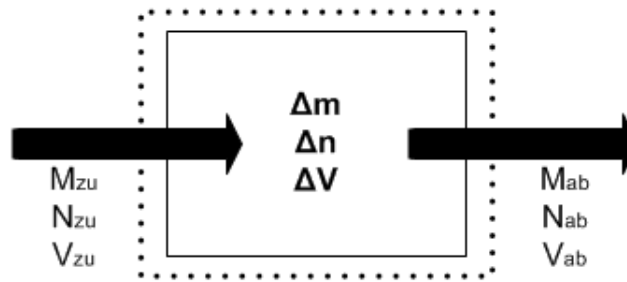


Abbildung 3: Massenbilanz

Wärmekapazität ist die Energiemenge, die zur Erhöhung der Temperatur von 1Kg eines Stoffes um 1K führt. Das Formelzeichen ist  $c$  mit der Einheit J/KgK. Bei der Energiezunahme oder -abnahme unter konstantem Druck wird von einer isobaren Wärmekapazität gesprochen. Wird die Energieänderung bei gleichbleibendem Volumen ausgeführt, wird von der isochoren spezifischen Wärmekapazität gesprochen.

## 2.3 Thermodynamische Systeme

Arbeit [3] ist Energie, die aufgrund eines Kraftunterschieds bzw. eines Potentials über eine Systemgrenze tritt. Sie wird mit dem Formelzeichen  $W$  angegeben und ist eine Energieform. Ihre Einheit ist J.

$$w_{v,12} = - \int_{v1}^{v2} p \cdot dv \quad (2.1)$$

$$w_{t,12} = \int_{p1}^{p2} v \cdot dp \quad (2.2)$$

**Es gelten folgende Hauptsätze:**

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik [3]

$$dU = \delta Q + \delta W \quad (2.3)$$

Der Hauptsatz enthält die Größen  $dU$  als die Änderung der inneren Energie eines **geschlossenen Systems** auf der einen Seite und  $\delta Q + \delta W$  als Summe von der Änderung der Wärme und der Arbeit auf der anderen Seite.

$$dq_{12} + dw_{12} = dh_2 - dh_1 + \frac{1}{2}d(c_2^2 - c_1^2) + dg(z_2 - z_1) \quad (2.4)$$

Die differentielle Schreibweise des ersten Hauptsatzes für **offene Systeme** [3] beinhaltet zusätzlich zu den Größen Wärme und Arbeit die Enthalpie  $h$ , die kinetischen und potentiellen Energieanteile.

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Energien sich ineinander umwandeln lassen. Sie können aber nicht gebildet oder vernichtet werden. Ändert sich die innere Energie in einem geschlossenen System, ist diese Änderung gleich der Änderung der Wärme und der Änderung der Arbeit.

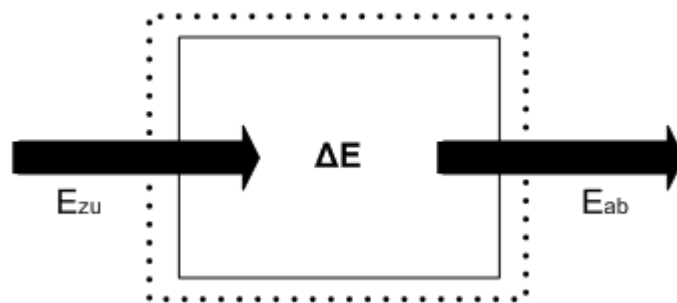


Abbildung 4: Energiebilanz

Die oben abgebildete Energiebilanz zeigt die Energieströme  $E_{zu}$  in das stationäre System und  $E_{ab}$  aus dem System heraus. Handelt es sich um ein instationäres System, findet im Inneren der Systemgrenze eine Energieänderung (Zunahme oder Verbrauch) statt.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{W_{diss}}{T} \quad (2.5)$$

Der Unterschied zwischen Wärme und Arbeit sowie die Unterscheidung zwischen Wärmestrom und mechanischer (oder elektrischer) Arbeit wird bei der Formulierung des ersten Hauptsatzes unvollständig und bedarf einer Formulierung des zweiten Hauptsatzes [3] um tiefer begründet zu werden. Der Entropietransport ist als bestimmende Größe zu nennen, welcher mit dem Transport an Energie zusammen verläuft. Bei der Arbeit tritt ebenfalls ein Energietransport über die Systemgrenze auf.

Die Wärme fließt stets in Richtung der fallenden thermodynamischen Temperatur über die Systemgrenze, dieses gilt nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik. Dieser macht jedoch keine Aussage darüber, wie schnell oder intensiv der irreversible Prozess Wärmeübertragung abläuft und in welcher Weise der transportierte Wärmestrom vom vorangetriebenen Temperaturgefälle abhängt. Das Gebiet der Thermodynamik wird somit durch einen Bereich der Wärmeübertragung ergänzt. Aufgabe der Wärmeübertragung ist es, diese Gesetzmäßigkeiten des Wärmetransports zu erklären.



Es werden dabei drei Gesetzmäßigkeiten der Wärmeübertragung unterschieden: „Die Wärmeleitung, der konvektive Wärmeübergang und die Wärmestrahlung.“

## 2.4 Energietransport im Bereich der Wärmeübertragung: Wärmeleitung, Konvektion, Strahlung

„Wärmeleitung [2] ist ein Energietransport zwischen benachbarten Molekülen aufgrund eines im Material vorhandenen Temperaturgradienten“.

„Die stärkste Temperaturänderung erfolgt normal zu den Isothermen und ist durch den Temperaturgradienten“ [2] gegeben:

$$\text{grad}\vartheta = \frac{d\vartheta}{dx}e_x + \frac{d\vartheta}{dy}e_y + \frac{d\vartheta}{dz}e_z \quad (2.6)$$

$e_x$ ,  $e_y$  und  $e_z$  sind dabei die Einheitsvektoren der drei vorkommenden Koordinatenrichtungen. „Der Gradienten-Vektor steht senkrecht auf der durch den betrachteten Punkt verlaufenden Isotherme und zeigt in Richtung des stärksten Temperaturanstiegs“ [2].

Der „Fouriersche Ansatz“ für die Wärmestromdichte [2] durch eine ebene Platte lautet:

$$\dot{q}_x = \frac{\dot{Q}_x}{\text{Fläche}} = -k \frac{dT}{dx} \quad (2.7)$$

Mit  $\dot{q}_x$  in  $\text{W/m}^2$  und  $\dot{Q}_x$  in W. Der Fouriersche Ansatz ist ein phänomenologischer Ansatz, welcher aus Beobachtungen heraus aufgestellt und verwendet wird. Die obere Formel bezieht sich auf eine ebene Fläche. Der Wärmetransport wird in Richtung abnehmender Temperaturen übertragen. Aus diesem Grund wird der Wert mit einem negativen Vorzeichen versehen. In folgender Abbildung dargestellt [aus 88]:

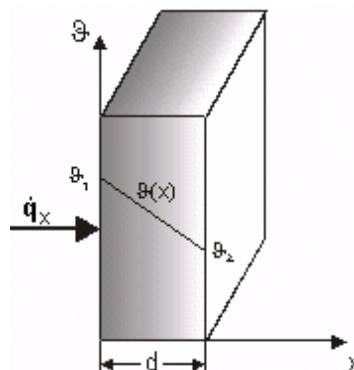


Abbildung 5: Wärmeleitung

Für eine endlich ausgedehnte Wand mit konstanter Leitfähigkeit bzw. konstantem Temperaturgradienten erhält man folgende Gleichung für den Wärmestrom:

$$\dot{Q}_x = -\lambda * A * \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{d} \quad (2.9)$$

Mit den Größen:

$\dot{Q}_x \rightarrow$  Wärmestrom durch Wärmeleitung [W]

$\lambda \rightarrow$  Wärmeleitfähigkeit [W/m\*K]

$A \rightarrow$  Fläche [m<sup>2</sup>]

$\vartheta \rightarrow$  Temperatur [K]

$d \rightarrow$  Dicke der Wand [m]

Konvektion: Nicht nur durch Wärmeleitung wird die Energie in einem strömenden Fluid transportiert, sondern auch durch das Fluid, welchem makroskopische Bewegungsabläufe widerfahren. Die Wärme fließt somit durch Leitung in einer virtuell aufgespannten Fläche des Fluids aufgrund des Temperaturgradienten. Es wird von einem konvektiven Wärmeübergang an dieser Stelle gesprochen und gemeint ist damit, dass das strömende Fluid von Wärmeleitung und Energietransport überlagert wird.

An der Wand tritt eine Wärmestromdichte auf. Diese hängt ab vom Temperaturfeld und auch vom Geschwindigkeitsfeld welches im Fluid auftritt. Mehrere Größen beeinflussen sich gegenseitig und es treten durch Wechselwirkungen erhebliche Schwierigkeiten auf. Das Problem wird in folgender Abbildung graphisch beschrieben [aus 88]:

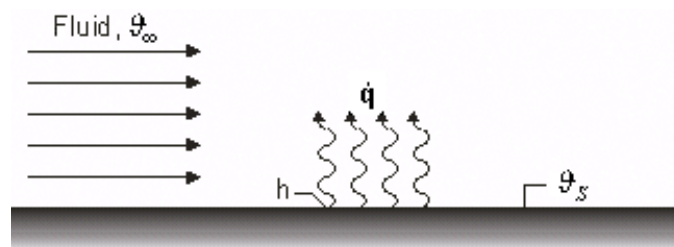


Abbildung 6: Konvektion

Es wird daher das Newtonsche Abkühlungsgesetz [2] zur Berechnung der Wärmestromdichte verwendet:

$$\dot{q}_w = h(\vartheta_s - \vartheta_F) \quad (2.10)$$

mit den Größen:

$\dot{q}_x \rightarrow$  Wärmestrom durch Konvektion [W]

$h \rightarrow$  konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]

$A \rightarrow$  Fläche [ $\text{m}^2$ ]

$\vartheta_S \rightarrow$  Oberflächentemperatur der festen Wand [K]

$\vartheta_F \rightarrow$  Temperatur des umgebenden Fluids [K]

Mit diesem wird die neue Größe, der örtliche Wärmeübergangskoeffizient  $h$  in  $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ , eingeführt.

Strahlung: Durch elektromagnetische Wellen gibt jeder Körper seine Energie an seine Umgebung ab. Der Körper, der eine positive Temperatur besitzt, kann Energie abgeben. Alle Arten von Energieabgaben werden zusammengefasst durch die Begriffe thermische Strahlung, Temperaturstrahlung oder Wärmestrahlung. Emission oder Abgabe von Strahlung stellt eine Umwandlung der inneren Energie des Körpers in Energie dar, die forttransportiert wird durch elektromagnetische Wellen. Nicht alle Energie wird durchgelassen, denn nur ein Teil der auftreffenden Energie wird reflektiert. Elektromagnetische Wellen, die auf Materie treffen, werden zum Teil absorbiert. Der Rest an Energie wird dagegen reflektiert oder durchgelassen. Folgende Abbildung [aus 93] beschreibt die Energiebereiche der Strahlung:

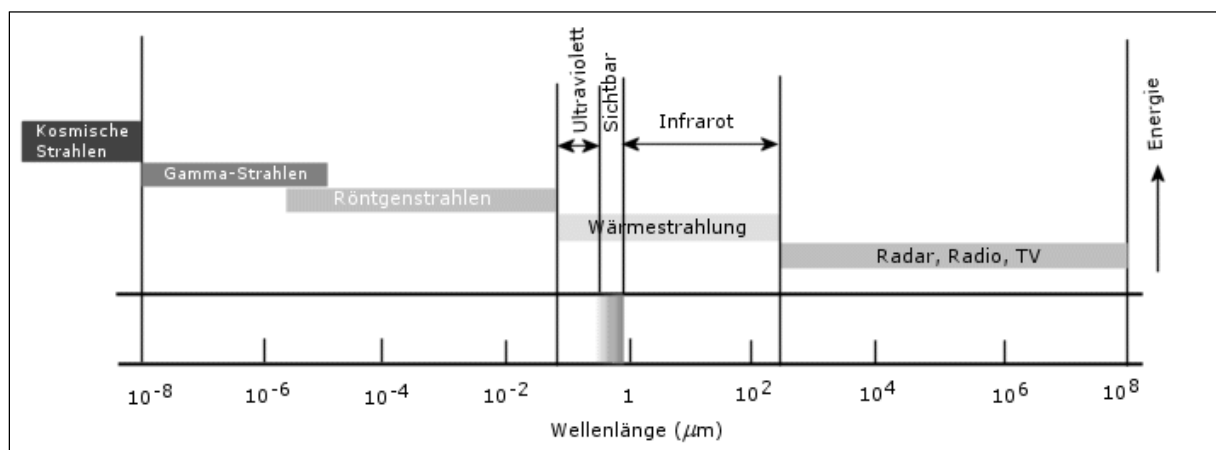


Abbildung 7: Wellenlänge  $\lambda/\mu\text{m}$  im Strahlungsbereich

Von einem Körper generell absorbierte Strahlungsenergie wird in innere Energie des Körpers umgewandelt. Der strahlende Körper mit Umgebung ist in Abbildung 8 [aus 88] dargestellt:

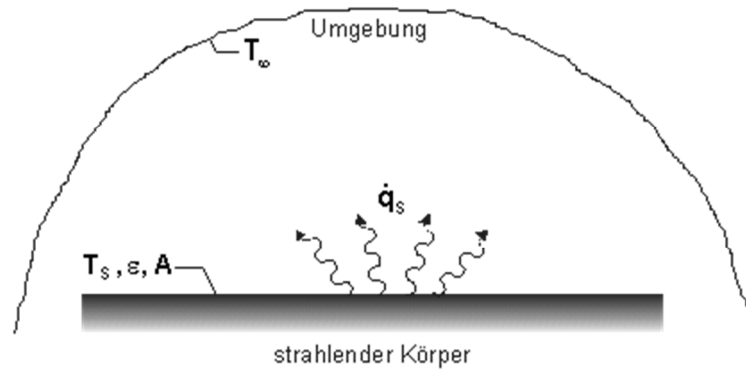


Abbildung 8: Strahlung

Es gibt eine oberste Grenze für die Emission von Wärmestrahlung, diese hängt ausschließlich von der thermodynamischen Temperatur  $T$  des strahlenden Körpers ab. Die folgende Formel<sup>3</sup> gibt die maximal mögliche Wärmestromdichte an. Die ausgesandte Wärmestrahlung von der Oberfläche eines Körpers:

$$\dot{Q}_s = \varepsilon * \sigma * A * (T_s^4 - T_F^4) \quad (2.11)$$

mit

$\dot{Q}_s \rightarrow$  Wärmestrom durch Strahlung [W]

$\sigma \rightarrow$  Stefan-Boltzman-Konstante [ $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]

$\varepsilon \rightarrow$  Emissionsgrad

$A \rightarrow$  Oberfläche des strahlenden Körpers [ $\text{m}^2$ ]

$T_s \rightarrow$  Oberflächentemperatur [K]

Mit  $\varepsilon$  als Emissionsgrad zwischen 0 und 1 mit  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . Dieser gibt die Emission eines Körpers an im Vergleich zu einem schwarzen Körper mit  $\varepsilon = 1$ .

<sup>3</sup> Dieses Naturgesetz wurde im Jahr 1879 von J. Stefan aufgrund von Experimenten angegeben und 1884 von L. Boltzmann aus der elektromagnetischen Theorie der Strahlung mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik hergeleitet. Es enthält eine universelle Konstante, die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$ , deren Bestwert  $\sigma = (5,67040 \pm 0,00004)10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  beträgt.

## 2.5 Elektrotechnik

### 2.5.1 Wechselstromnetze und übertragene Leistung

Die einzelnen theoretischen Lösungskonzepte an elektrischen Energieeinsparmaßnahmen sind zum einen die Blindstromkompensation und die Volllastauslegung von elektrischen Maschinen. Wird die Energie vom Energieversorger transportiert, entsteht Blindstrom. Dieser Strom wird zur Erzeugung eines Magnetfeldes benötigt (z.B. bei Motoren, Vorschaltgeräten, Induktivitäten usw.). Durch den Blindstrom werden in den Komponenten Kabel, Transformatoren und Motoren zusätzliche Verluste erzeugt. Denn genutzt werden kann nur die Wirkleistung, aber die Übertragungseinrichtungen müssen auf jeden Fall für die Scheinleistung ausgelegt sein. Die folgende Abbildung beschreibt den Zusammenhang elektrischer Energieflüsse in einem Industriebetrieb. Die Energiequelle liefert den Strom an den Stromrichter, welcher zwecks Arbeitspunkteinstellung den Strom in Abhängigkeit von der Antriebsregelung an die elektrische Maschine weitergibt. Diese treibt durch die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie eine Arbeitsmaschine an, welche ihre betrieblichen Aufgaben (Produktionsanlagen, Werkzeugmaschinen, Förderanlagen usw.) durchführt. Die Einflüsse von Energiequelle auf die Arbeitsmaschine und deren Wechselwirkungen sind in Abbildung 9 [aus 56] dargestellt:

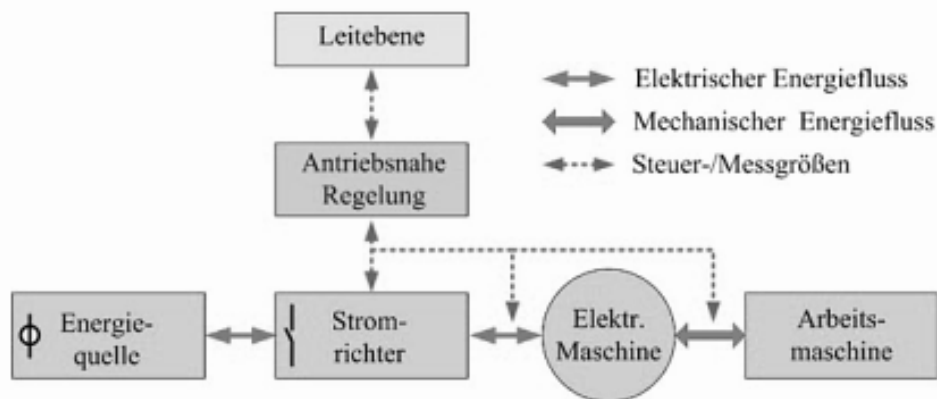


Abbildung 9: Elektrische Energieflüsse in der Industrie

### 2.5.2 Blindstromkompensation

Durch den Blindstrom entstehen generell höhere Verluste im Netz. Die Endverbraucher können nur die Wirkleistung nutzen, jedoch fallen durch induktive Verbraucher auch Blindleistungen an. Zum Beispiel entstehen Blindstromkosten für Kunden mit niedrigem Leistungsfaktor (z.B. bei  $\cos \varphi < 0,93$ ).

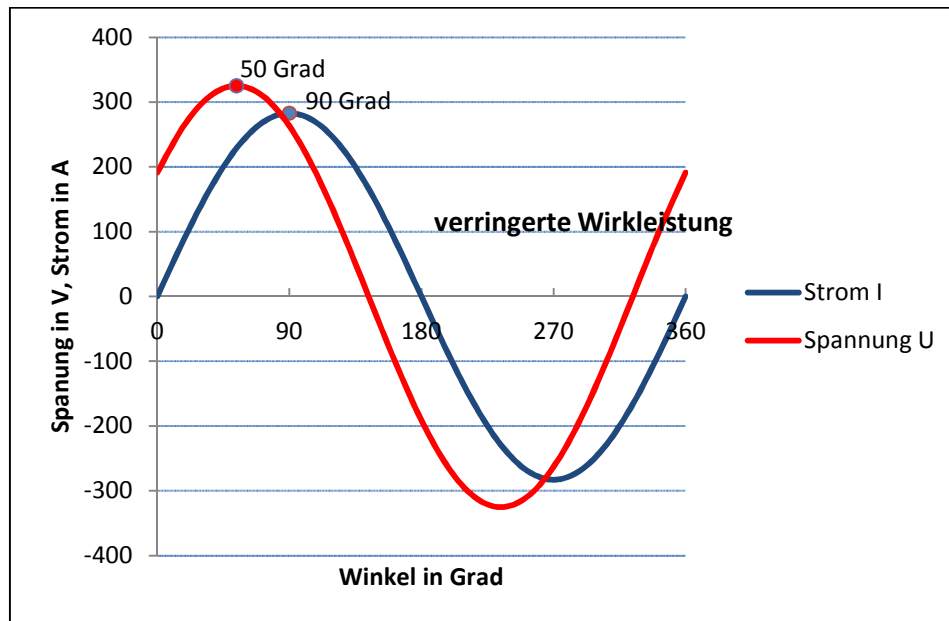


Abbildung 10: Phasenunterschied von Strom- und Spannungskurve, verringerte Wirkleistung

In Abbildung 10 oben sind die in Phase und phasenverschoben liegenden Strom- und Spannungskurven dargestellt. „Für eine Phasenverschiebung  $\varphi$  von 90 Grad ist  $(\sin \varphi) = 1$  und daher ergibt sich“ [77]:

$$Q = U_{eff} * I_{eff} * \sin \varphi = U_{eff} * I_{eff} * 1 = U_{eff} * I_{eff} \quad (2.12)$$

$$\rightarrow Q = S \text{ (denn } S = U * I \text{)}$$

Zur Erläuterung: Beträgt die angenommene Phasenverschiebung genau 90°, wird daraus ausschließlich Blindleistung abgerufen. „Die sich aus dem Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung ergebende Leistung, die Scheinleistung  $S$ , setzt sich aus Wirk- und Blindanteil zusammen, und ist genau gleich dem Blindanteil, da der Wirkanteil gleich Null ist“ [77]. Sie besteht aus dem Wirk- und Blindanteil, da nur der Blindanteil ins Gewicht fällt auf Grund des wegfallenden Wirkanteils.  $\cos \varphi$  wird als Leistungsfaktor bezeichnet, oft auch als Wirkleistungsfaktor. Zu finden sind diese technischen Daten auf allen Typenschildern von elektrischen Verbrauchern. Das Verhältnis von Wirkleistung  $P$  zu Scheinleistung  $S$  wird als Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  bezeichnet. Dieser Faktor berechnet sich nach dem Quotienten:  $\cos \varphi = P/S$ . Der Leistungsfaktor beschreibt die gewünschte Wirkleistung, welche ausgehend von der Scheinleistung umgesetzt wird. Der Blindleistungsfaktor  $\sin \varphi$  gibt das Verhältnis zwischen Scheinleistung  $S$  und Blindleistung  $Q$  an und berechnet sich:  $\sin \varphi = Q/S$ .

Die Blindleistung hat folgende Auswirkungen: Die elektrischen Netze werden außer durch direkt übertragene Wirkleistung durch Blindleistung induktiver Verbraucher belastet [14]. Das Verteilungsnetz mit seinen Bestandteilen wie Transformatoren, Wechselstromleitungen und technischen Anlagen, aber auch das kundeneigene Netz muss auf beide Leistungsteile ausgelegt sein. „Bei vorhandenen Netzen reduziert die Blindleistung die vom Kunden gewünschte Wirkleistung. Bei einem gegebenen Wirkleistungsbedarf erhöhen sich mit zunehmender Blindleistung“ [77]:

- die vom Verteilernetzbetreiber benötigte Übertragungskapazität als zur Verfügung gestellte Leistung [77]
- die im Kundennetz benötigte Übertragungskapazität (Anlagenauslegung, Transformatoren)[77]
- die im Kundennetz vorkommenden Übertragungsverluste (Wirkstromverluste) [77]

Die Blindleistung verursacht außerdem folgende Kosten:

- Auf den Monat angerechnet fallen generell Kosten für den Blindstrommehrverbrauch an. Dieser übersteigt oftmals „die Freigrenze von 50% der Wirkarbeit“ [77].
- Beim Kunden werden nun die Kosten, welche für den Blindstrom anfallen, berechnet
- Blindleistungsübertragung erfordert eine höhere Anschlusskapazität und höhere bauliche Planungsmaßnahmen [77].

Gegenüber den elektrischen Energieeinsparmaßnahmen sind nun auch die anderen Energieeinsparmaßnahmen zu nennen. Die Energieeinsparungsmöglichkeiten in Form von Wärme können der Literatur entnommen werden. Generell wird unterschieden zwischen der Energierückgewinnung in Druckluft-/Vakuumnetzen, den Produktions-Kühlwasserkreisläufen (Kälte- und Heizungsanlagen) und den Lüftungsanlagen (regenerativ und rekuperativ).

### **2.5.3 Effizienzklassen elektrischer Maschinen**

Um die Energierückgewinnungspotentiale einer elektrischen Maschine feststellen und messen zu können, wird in dieser Dissertation auf die mechanischen Bewegungsvorgänge einer elektrischen Maschine eingegangen. Die Beschreibung der Vorgänge ist zur Herleitung der Effizienzmessung erforderlich. In der folgenden Übersicht sind die Bewegungen Translation und Rotation mit den zugehörigen Leistungsgrößen aufgeführt: Antriebsleistung und kinetische Energie [Abb. aus 56]. In beiden Bewegungsvorgängen sind diese von der Geschwindigkeit und von der eingesetzten Kraft abhängig.

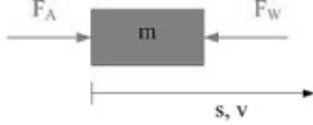
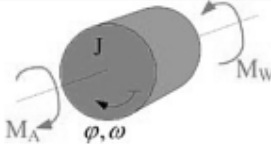
	Translation	Rotation
		
Bewegungsgleichung	$F_B = F_A - F_W = ma$ mit $a = \dot{v} = \ddot{s}$	$M_B = M_A - M_W = J\alpha$ mit $\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\varphi}$
Antriebsleistung	$P_A = F_A \cdot v$	$P_A = M_A \cdot \omega$
Kinetische Energie	$W_T = \frac{1}{2}mv^2$	$W_R = \frac{1}{2}J\omega^2$

Abbildung 11: Übersicht über die Bewegungsvorgänge

Bestimmt werden müssen zur Effizienzmessung vorher die maximal benötigte Drehzahl, die Strombegrenzung und die Begrenzung der Ruckgeschwindigkeit. Bewegungsabläufe in einer Produktion oder bei einer Werkzeugmaschine sind oft periodisch und somit kann die abgegebene Leistung über die Periodendauer auf die zugeführte Leistung bezogen werden, anders als beim Wirkungsgrad, der nur eine statische Größe darstellt.

Der Effizienzgrad [56]  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{\int_{TS} P_{ab}(t) dt}{\int_{TS} P_{zu}(t) dt} \quad (2.13)$$

Der Wirkungsgrad von elektrischen Maschinen beinhaltet gleiche Größen, ist jedoch nicht auf die Periodendauer bezogen:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \quad (2.14)$$

Leistungsverluste, welche in elektrischen Maschinen stattfinden, sind die Reibungsverluste, ohmsche Verluste in den Wicklungen, Motorverluste und Eisenverluste (Hystereseverluste) [75].

Nachteile sind, dass außerdem die Elektromotoren oft auch zu groß ausgelegt und daher dann nur auf Teillasteinstellung betrieben werden [81, 82]. Je weniger ein Motor an seiner Auslastung betrieben wird, desto geringer ist dessen Wirkungsgrad. Dieses führt zu einem ungünstigeren Leistungsfaktor. Auf Grund von Untersuchungen des Fraunhofer Institutes für System- und Innovationsforschung konnte im Allgemeinen festgestellt werden, dass auf Elektromotoren und deren Regelungssysteme rund 40% des weltweiten Stromverbrauches entfallen [94]. Mit der Verordnung 2005/32/EG sind die Effizienzklassen IE1 bis IE3 eingeführt wurden. IE1 steht für Wirkungsgrad im Standard, IE2 für gehobenen Wirkungsgrad und IE3 für Premiumwirkungsgrad. Diese sind in der Abbildung 12 unten im Graph aufgeführt. IE4 stellt eine zukünftige Erweiterung der



Effizienzklasse dar [94]. Folgende Abbildung [aus 71] stellt den Motorwirkungsgrad der unterschiedlichen Effizienzklasse dar:

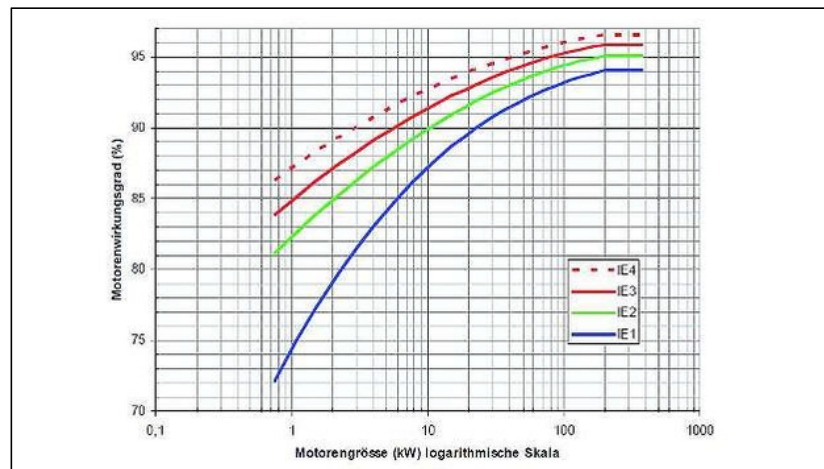
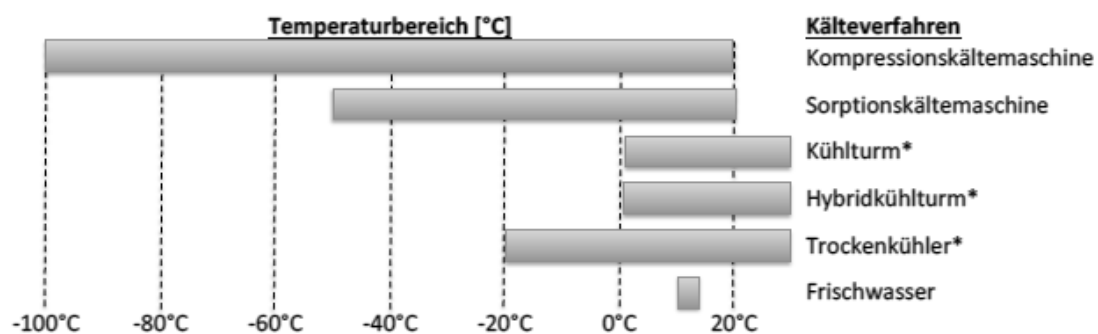


Abbildung 12: Wirkungsgradsteigerung mit Zunahme der Betriebsleistung

## 2.6 Prozesskühlverfahren und -anlagen

Zur Kühlung von Wasserkreisläufen sind generell drei Arten von Kühlmechanismen bekannt: die Kühlung des Wassers mittels Kältemaschinen, mittels Trockenkühlersystemen und die Kühlung durch Kühltürme. Die folgende Abbildung [aus 23] zeigt die möglichen Verfahren von Kühl- und Kälteanlagen. Angeben wird der mögliche Temperaturbereich von -100°C bis 20°C.



\* Verfahren ist abhängig von Umgebungstemperatur und relativer Feuchtigkeit

Abbildung 13: Kühltemperatur und Kühlprozesse in der Industrie

Zur Wärmerückgewinnung stellt die Kältemaschine den sinnvollsten Teil dar, die anderen beiden Arten eignen sich ausschließlich um Wärme abzuführen, deshalb werden diese Methoden in dieser Dissertation weniger besprochen. Das Prinzip einer Kältemaschine kann mit dem einer Wärmepumpe verglichen werden. Das Funktionsprinzip der beiden Maschinen ist sehr ähnlich, sie unterscheiden sich aber wesentlich im Temperaturniveau.

## 2.7 Last- und Energiemanagement in der Industrie

Die Wärmebereitstellung beeinflusst die Energiekosten sehr stark. Die Selektion der Energieträger ist abhängig von Faktoren wie der Menge, den Verteilungen, der benötigten Temperaturen, Aufstellmöglichkeiten von Energieanlagen, vorhandene Abwärme (nutzbare Energie) und dem Gebäude selbst [81]. Die nutzbare Energie ist ein entscheidendes Kriterium, denn letztendlich entscheiden die Art und der Nutzungsgrad der Wärmerückgewinnung über die Verrechnung zwischen gelieferter und verbrachter Energie und somit über die entstehenden Stromkosten. Beispiel: Bei einer erfolgreichen Wärmerückgewinnung muss weniger oder gar weder gekühlt noch geheizt werden. Ausreichende Lüftungsmöglichkeiten werden jedoch in der Industrie vorausgesetzt. Im vorangegangenen Abschnitt sind die verschiedenen Systeme für eine effiziente Werkhallenbelüftung, die der freien Lüftung, der Entlüftung, der Belüftung sowie der Be- und Entlüftung zugleich und auch die Verfahren mit oder ohne Wärmerückgewinnung schon einmal angesprochen worden.

In der Literatur und durch Internetrecherche lassen sich Aussagen ableiten, dass erhebliche wirtschaftliche Energieeffizienzpotentiale im industriellen und gewerblichen Bereich festzustellen sind. Mit ihrer Erschließung tragen sie zur Kostenentlastung der Betriebe bei. „In fast allen Betrieben lassen sich je nach ihrer Abhängigkeit durch ihr Branchengebiet und der Betriebsgröße Einsparpotentiale von bis zu 20% finden. Diese Potentiale werden aber von vielen Unternehmen nicht genutzt“ [83]. Die Technik der KWK-Anlagen wird in Deutschland nur zu einem Zehntel ausgeschöpft [100]. Obwohl eine Studie des Bremer Energie Instituts und des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt im Auftrag des Wirtschaftsministeriums zeigt, dass KWK-Anlagen mehr als ein Drittel des Wärmebedarfs und mehr als die Hälfte des Strombedarfs decken könnten.

Deutschland ist einer der größten Märkte für Kältemaschinen in Europa [96]. Die Anteile am „Umsatz und die Stückzahlen für Absorptionskältemaschinen/Wärmepumpen“ [96] vergrößern sich ständig. Früher waren in Deutschland rein wirtschaftliche Gesichtspunkte der Grund, ob Absorptionskältemaschinen und Wärmepumpen verwendet werden sollen oder nicht. Werden die Kompressionskältemaschinen in direkten Vergleich gesetzt, müssen die sich ständig verändernden „gesetzlichen und verordnungspolitischen Rahmenbedingungen“ [96] immer mehr betrachtet werden. Die „Novellierungen des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes (KWKG), des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) und des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG)“ [96] sind hier als wichtige Einflussfaktoren zu nennen. Natürliche Kältemittel werden in der „sog. F-Gase-Verordnung“ [96] im Gegensatz zu den „synthetischen Kältemitteln“ eher ausgewählt. Dieses ist ein

weiterer stark ins Gewicht fallender Vorteil von Absorptionskältemaschinen. Auch BHKWs lassen sich mit einer Absorptionskältemaschine kombinieren und dadurch können höhere Kosteneinsparungspotenziale realisiert werden. Die Bundesregierung unterstützt durch verschiedene Förderprogramme die o.g. Technologien wegen ihrer Umweltfreundlichkeit, z.B. „ein gestartetes Impulsprogramm für Kälte- und Klimaschutz“ [96]. Dieses bündelt das Maßnahmenpaket für den Klimaschutz. Enthalten sind die Effizienzanalyse der Kälteanlagen und u.a. auch Finanzierungsmaßnahmen zur Sanierung von Altanlagen. Der Basisfördersatz solcher Anlagen kann von Nettoinvestitionsvolumen ausgehend bis zu 25% betragen. Alternativ kann auch eine Bonusförderung von bis zu 30% erfolgen [100].

Das o.g. Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz beinhaltet u.a. die anteilige Verwendung von regenerativen Energien zum Heizen sowie Kühlen in Neubauten durch den Erbauer. Die Wärmerückgewinnung speziell in raumlüftungstechnischen Anlagen fällt in § 7 Absatz 1.a unter dem Titel „Ersatzmaßnahme zur Erfüllung der geforderten Quoten“. Das EEWärmeG stellt Anforderungen, die dann erfüllt sind, wenn die Wärmerückgewinnungstechnik in RLT-Anlagen mindestens 50% des gesamten Energiebedarfs für den Heizungsbedarf, Warmwasserbedarf oder Kältebedarf eines Gebäudes abdeckt“ [95].

Vom Gesetzgeber werden folgende Zulassungsvorschriften bei einem Betrieb von RLT-Anlagen (Raumlüftungsanlagen) vorgeschrieben: WRG-Systeme in RLT-Anlagen gelten als sog. Ersatzmaßnahme (gemäß Anlage IV). Zugelassen sind WRG-Anlagen nur, wenn:

- der Anlagenwärmerückgewinnungsgrad mindestens 70% beträgt
- wenn eine Leistungszahl (WRG stammenden Wärme zu Stromeinsatz) von 10 für den Betrieb der RLT-Anlagen erreicht wird
- die Jahresarbeitszahl beim Einsatz der Luft/Luft-Wärmepumpen mindestens 3,5 beträgt (Nachweis: Wärmemengen- und Stromzähler)

In den heutigen Unternehmen bleiben leider noch viele Effizienzpotentiale ungenutzt, denn es gibt immer noch viele Organisations- und Kommunikationsbarrieren [83]. Die Analyse der Abnahmeverhältnisse, der Leistungskomponenten und des Lastganges dienen als Steuerungsmethoden um den täglichen Energiebedarf zu reduzieren. Ist der Stromvertrag leistungsabhängig, zahlt das Unternehmen für die abgenommene Leistungsspitze. Es zahlt die Blindleistung (siehe im ersten Teil der Arbeit) und nicht nur die Wirkleistung. Die höchste abgenommene Leistungsspitze wird gemessen und darauf in Rechnung gestellt. Dieses geschieht monatlich oder jährlich. Bis zu 30 % kann der Anteil des leistungsbezogenen Preises an den

Gesamtstromkosten betragen [81]. Die Stromkostenverringerung kann somit entweder nur den Stromverbrauch oder nur durch die Absenkung der Leistungsspitzen erfolgen. Für eine Leistungsspitzenanalyse wird der Energieversorger die Aufzeichnung einer Ganglinie der elektrischen Leistung fordern. Bei der Aufnahme einer solchen Ganglinie handelt es sich meistens um eine kostenlose Dienstleistung vom Energieversorger.

Der in der Abbildung 14 dargestellte Graph der Leistungsdaten wird in dieser Darstellung täglich oder wöchentlich erstellt und beschreibt folgenden Sachverhalt: Die auf die y-Achse bezogenen Leistungswerte werden im Viertelstundentakt (bezogen auf die x-Achse) gemessen. Eine Maßnahme wäre, die stromrelevanten Arbeitsvorgänge um 15 Minuten zu verschieben. Mit dem System könnten Lastspitzen gesenkt werden. Beispielsweise ist zwischen 8:45 und 10:00 ein niedriger Lastanfall abgebildet. „Eine Reduzierung der Stromkosten kann daher neben einer Verringerung des Stromverbrauchs auch durch die Absenkung von Leistungsspitzen erfolgen. Dazu sollte zunächst eine Aufzeichnung des elektrischen Lastgangs vom Energieversorger angefordert werden. Diese Dienstleistung wird in den meisten Fällen unentgeltlich angeboten“ [81]. Die Verbraucher und Problemverursacher solcher Lastspitzen können aufgedeckt werden durch „eine Kombination mit einem aktuellen Lastgang“ [81].

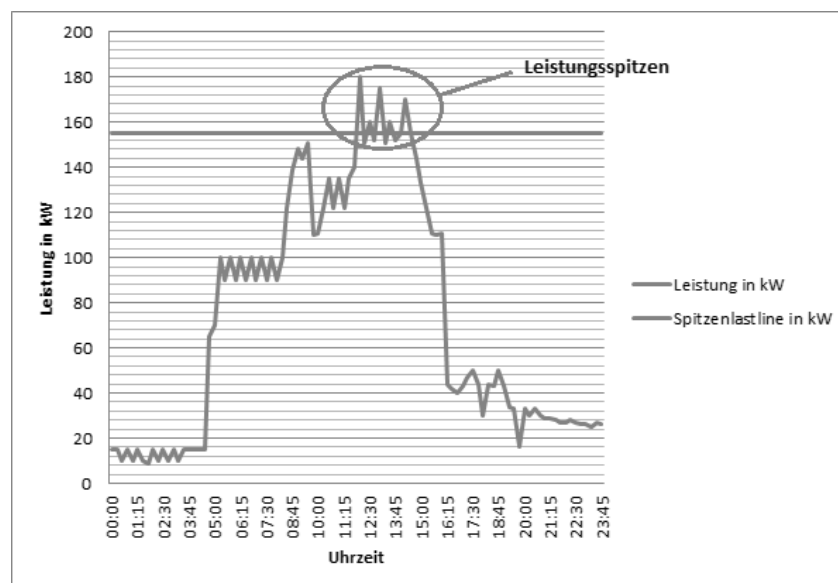


Abbildung 14: Lastganglinie am Wochentag, Spitzenlastbetrachtung

Nach deren Identifikation und Selektion bestehen verschiedene Möglichkeiten [81] zur Stromspitzenreduzierung:

- Die Einsatzzeit muss dementsprechend geplant werden, damit stromstarke Verbraucher nicht alle gleichzeitig eingeschaltet werden.
- Stromintensive Verbraucher sollten nicht parallel laufen (Signal bei Lastüberschreitung)
- Die oben genannten Möglichkeiten erfordern ein effektives Lastmanagementsystem. Dieses könnte verschiedene Geräte für unterschiedliche vorher automatisch berechnete Zeitspannen ein und ausschalten.

Die oben erklärte Lastganganalyse kann Verbraucher außerhalb der Betriebszeiten (zugehörige Grundlast) aufzeichnen. Wird außerhalb der Betriebszeiten gemessen, lassen sich somit auch diejenigen elektrischen Verbraucher analysieren, die evtl. abgeschaltet werden können, weil sie Arbeit verrichten, aber nicht benötigt werden. Eine solche Lastganganalyse kann in unmittelbar aufeinanderfolgenden Abständen und bei einer außerplanmäßigen Änderung der Stromabnahme (z.B. anderer Produktionsablauf) wiederholt werden. Außer der Lastganganalyse wird in der Industrie zur Energiekontrolle ein ebenso erfolgreiches Energiemanagement eingesetzt. „Das Energiemanagement umfasst die Summe aller Maßnahmen, die geplant und durchgeführt werden, um bei geforderter Leistung einen minimalen Energieeinsatz sicherzustellen“ [43].

## **2.8 Problemstellung des Energiemanagements im betrachteten Unternehmen**

### **2.8.1 Generelles energiepolitisches Konzept**

Das Energiemanagement umfasst auch im betrachteten Unternehmen „[...]alle Maßnahmen, die geplant und durchgeführt werden, um Energie so effizient wie möglich zu nutzen“ [18]. Es existiert in heutigen Unternehmen eine Verfahrensanweisung durch ein Energiemanagement den Energieeinsatz, angefangen vom Energieeinkauf bis zum Energieverbrauch, aufrechtzuhalten und zu optimieren.

Das Energiemanagementkonzept bezieht sich als Ganzes auf alle drei Werke (1, 2 und 3) und ist laut Verfahrensanweisung als Umweltmanagementsystem zu betrachten. [18] Die Zuständigkeiten des Energiemanagements beinhalten die Einführung und Aufrechterhaltung des Energiemanagements und es obliegt der Geschäftsführung [74], welche Vertreter benannt werden. Diese Person übernimmt die Funktion des Energiemanagementbeauftragten. Der Umweltbeauftragte, welcher ebenso benannt wird, hat beratende Funktion und pflegt die Dokumentation.

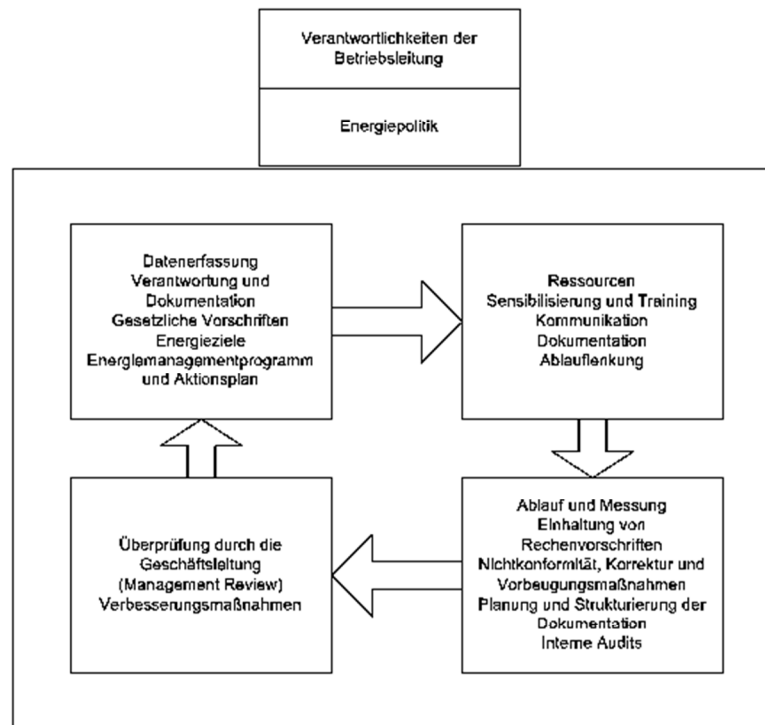


Abbildung 15: Energiemanagementsystem nach ISO 50001

Auch im betrachteten Unternehmen (dieser Arbeit) werden Energiemanagement und auch Umweltmanagement als ein Regelkreis beschrieben, in dem abhängig von den gesetzten Zielen eine Energieaufgabe erfüllt, das Ergebnis überprüft und bewertet wird. Neue Zielvorgaben und Optimierungsmöglichkeiten entstehen durch diese Bewertungsmethodik. Werden Maßnahmen zur Korrektur beschlossen, bilden diese den Ausgangspunkt für den erneuten Durchlauf eines Kreislaufs, den oben genannten PDCA (Plan, Do, Check, Act) Zyklus. Es folgt im ersten Schritt die Bestandsaufnahme mit einer systematischen Erfassung der Energieverbrauchsdaten und die Auflistung der Energieabnehmer des Unternehmens. Die Verfahrensanweisung gibt an, dass alle Einflussfaktoren auf den Energiekonsum zu berücksichtigen sind. Als Bewertung erfolgt die Aufbereitung der ermittelten Daten zu klar definierten Kennzahlen. Die für die Aufbereitung der Kennzahlen verwendeten Eingangsgrößen sind laut Verfahrensanweisung: der „jährliche Energieverbrauch (Strom, Erdgas, Treibstoffe), Energiebezugskosten, Anschluss- und Leistungsdaten, Transparenz über die Energieverbraucher, Energieflussbild, Ermittlung der Hauptverbraucher (Produktionsanlagen, Beleuchtung, Druckluft, etc.), Einzelmessungen, kontinuierliche Messungen, jährlicher Vergleich“ [18].

Dem Energiemanagementbeauftragten obliegt die Aufgabe, seine strategischen Energieziele mit der Unternehmenspolitik in Einklang zu bringen. Der Energiebeauftragte legt die kurzfristigen, operativen Energieziele fest. Konkrete Aktionen für eine erfolgreiche Energiereduzierung werden aus der Datenerfassung und Datenauswertung abgeleitet. Für die Umsetzbarkeit der Maßnahmen bedarf es

einer sorgfältigen Überprüfung. In welcher Reihenfolge die Maßnahmen umgesetzt werden, bestimmen Kriterien wie das „voraussichtliche Einsparpotential, die Umsetzbarkeit und die Amortisation“ [18]. Die geplanten und bereits durchgeführten Maßnahmen werden in einer Auflistung eines Energieprogramms vorgestellt.

## 2.8.2 Verwendete praktische Lösungskonzepte

Der betrachtete Betrieb, bestehend aus derzeit drei Werken (Stand Aug. 2016) besteht in Werk 1 aus sechs Produktionsstätten, in Werk 2 aus drei Produktionsstätten und in Werk 3 aus einer Produktionsstätte. Zu den elektrischen Energieeinsparmöglichkeiten ist der Istanalyse vorwegzunehmen, dass sich Mittelspannungsanlagen in jeder Produktionshalle befinden. In ihnen wird die vom Energieversorger ankommende Netzspannung vom Dreiphasen-Mittelspannungsnetz 20kV auf eine Dreiphasen- Niederspannung von 400Volt heruntertransformiert. An den Niederspannungsanlagen existieren Einrichtungen zur Blindstromkompensation. Durch diese Festkompensationseinrichtungen kann die Blindleistung reduziert und eine ausschließliche Nutzung der Wirkleistung angenähert werden. Eine automatisierte Beleuchtungsausschaltung in Lager- und Produktionsbereichen reduziert die Stromkosten durch Abschaltung nach einer bestimmten Betriebszeit. Ebenso ist die LED Beleuchtung zum Teil in Beleuchtungsanlagen, die sich im Dauerbetrieb befinden (Notausgangsleuchten), eingeführt und zum Teil umgerüstet wurden.

Die Anschaffung eines sog. „Air-Leaders“ (Druckluftüberwachungssystem) zur sparsamen Druckluftversorgung über die zentrale Druckluftleitung erlaubt eine genaue Regulierung des Druckes und eine effektive Auslastung der Regel- und Festkompressoren. Ermittelt wird eine optimale Betriebsreihenfolge der Kompressoren. Es wird sichergestellt, dass immer nur die effizienteste Kombination der Kompressoren (unabhängig von Hersteller und Leistung) eingeschaltet wird, welche die zur Produktion benötigte Druckluft erzeugt. Eine falsche Drehzahl und eine dadurch zu hohe Leistungsaufnahme werden minimiert [98].

Für den Produktionsbereich direkt wird die Beschaffung neuer stromsparender und energieeffizienter Maschinen (E-Maschine Werk III) in Betracht gezogen.

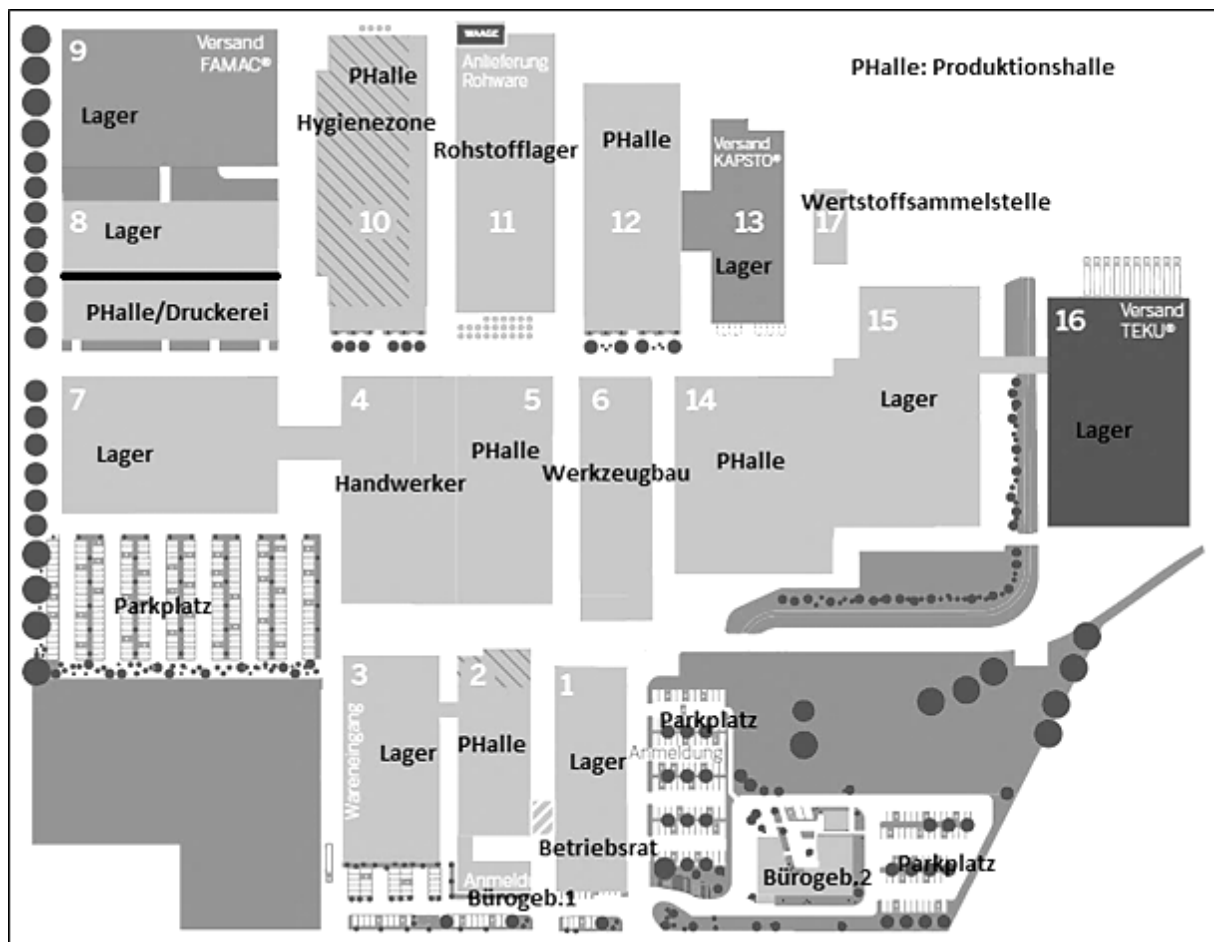
Zu dem thermodynamischen Teil sind folgende Energieeinsparungsansätze zu nennen:

Die in einigen Pumpenhäusern existierenden Kältemaschinen verwenden Wärmetauscher zur Abgabe ihrer Abwärme an das Heizungssystem. Ebenso verwenden einige Kompressoren Wärmetauscher mit Anschluss an die Heizungssysteme.

Andere Kompressoren geben ihre Wärme mit der Abluft in Lagerhallen ab, ohne Wärmetauscher und ohne das installierte Heizsystem zu verwenden.

Laufende Effizienzprojekte
Abschaltung von nicht produzierenden Maschinen
Kühlturmpumpenregelung in Abhängigkeit der Verschmutzung der Plattenwärmetauscher
Eco Maxx Beleuchtungsregelung
Heizungsoptimierung der Halle 5
Isolierung der Trinkwasserleitung, um im Sommer die Spitzenlastkühlung voll auszunutzen.
Einsatz einer Wärmepumpe in Halle 10 - Kälteseite wird vom Formkühlkreis abgenommen, um die Kälte zu nutzen.
Umbau vom Pumpenhaus Halle 5 - Erneuerung aller Pumpen - Umbau auf FU-Druckregelung, Erneuerung der Kühltürme Regelung mit FU
Optimierung der Nachblaszeit von Druckfördergeräten
BHKW
Druckluftreduzierung (Druckluftwartung, Leckstellenbeseitigung)
Druckluftnetzausbau, Aufteilung der Druckluftnetze
Druckregelung der Verbraucherpumpen in Halle 14
D1 – Wärmerückgewinnung aus Druckluftkompressoren (Einspeisung ins Heiznetz)
D5 – Anschluss Luftansaugung direkt nach außen

Tabelle 1: Laufende Energieeinsparungsmaßnahmen

Abbildung 16: Übersicht Unternehmen, Werk1<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Abb. aus PP-Betriebssystem, „Lageplan“, Pöppelmann GmbH & Co. KG, Lohne, 2012



Die in den Heizungssystemen vorliegenden Absorptionsanlagen sind im folgenden Kapitel der Istaufnahme auf ihren aktuellen Stand der Energierückgewinnung zu überprüfen und die Vor- und Nachteile später in der Analyse abzuwägen. Die Energierückgewinnungsverfahren sollen nach den Energiearten geordnet und in Simulationsverfahren getestet werden.

Die Erneuerung der Pumpenhäuser des betrachteten Unternehmens befindet sich in Planung. Es werden die Anlagen samt Pumpen und Kältemaschinen nach und nach erneuert (Kältemaschine „Quantum“). Frequenzumrichter zur Pumpendrehzahlregelung sind installiert und erlauben eine effektive Druckanpassung der Pumpen an die benötigte Wassermenge. Derzeitige laufende Energieeinsparmaßnahmen sind noch einmal in folgender Übersicht aufgeführt:

### **2.8.3 Ansätze zur Effizienzsteigerung**

Die vermehrte Anschaffung von energieeffizienten Maschinen wäre sicherlich ein wichtiger Ansatzpunkt, da das Arbeitsmedium „Maschine“ im betrachteten Unternehmen den größten Anteil an elektrischen Betriebsmitteln darstellt. Die Weiterentwicklung der Pumpenhäuser und die Wärmerückgewinnung an den Kältemaschinen sowie die Stromrückgewinnung und Blindleistungskompensation an den Pumpen wäre der zweite Ansatzpunkt. Gleiches gilt für das Netzwerk der Kompressoren für die Druckluftversorgung, dessen Abwärme nicht in allen Fällen effizient genutzt wird.

Gesucht wird nach einer optimalen Energieausnutzung im Sommer sowie im Winter. Die Energieausnutzung sollte stabil und linear sein um unnötige Schwankungen im Lastmanagement zu vermeiden. Die Maßnahmen für einen Energieeinsparungsansatz sind somit abhängig vom Energieverbrauch der Maschine. Dieser Sachverhalt priorisiert die Aufstellung einer allumfassenden Energiebilanz eines Energieverbrauchers, der in dem oben betrachteten Betrieb in den Produktionshallen 2, 5, 10, 12 und 14 am häufigsten vorkommt.

Diplomarbeiten in diesem Themenbereich beschäftigten sich mit dem Effizienzvergleich verschiedener Maschinenantriebssystemen [9] und der standardisierten produktspezifischen Prüfung des Energieverbrauches [29]. Die Inhalte werden im folgenden Kapitel „Stand der Forschung“ dieser Dissertation behandelt werden.

Die Bilanzierung sollte demnach mit einer Spritzgießmaschine erfolgen. Für die Bilanzierung sind die in den Theoretischen Grundlagen angesprochenen Energieeingangs- und Energieausgangsgrößen zu messen und aufzunehmen. Es folgt somit die Zielbeschreibung.

## 2.8.4 Schlussfolgerung und Zieldefinition

Für die Vorbereitung und Durchführung praktischer Messreihen sind folgende Fragen zu diskutieren und zur Energieüberprüfung voranzustellen:

- a) Welche Abschnitte beim Spritzgießen benötigen die meiste Energie?
- b) Welche Parameter beeinflussen diese Abschnitte?
- c) Lassen sich diese Prozesse zusammenfassen und Verallgemeinerungen auf den Energieverbrauch aufstellen?
- d) Welche Abbildungs- und Messmethoden sind für die Prozessaufnahmen geeignet und sind sie hinreichend genau?
- e) Sind diese Methoden verifizierbar?
- f) Sind diese Möglichkeiten für das Unternehmen lohnenswert in Hinblick auf die technischen Ergebnisse und wirtschaftlich?

Ziel dieser Arbeit soll die Erarbeitung einer Messmethode zur Auswertung von Energieprozessen für die Kunststoffindustrie sein mit Vergleich der bisher eingesetzten Messmethoden des Istzustandes. Schließlich soll die praktische Messmethode einer Plausibilitätsprüfung unterzogen und die gewonnenen Erkenntnisse herausgestellt werden.

Anschließend sollen Möglichkeiten zur Parameterveränderung und Effizienzverbesserung aufgezeigt werden. Die Ergebnisse sind im Hinblick auf Ihre Zusammensetzung (Herleitung) zu analysieren und einer Plausibilitätsprüfung zu unterziehen. Den Unternehmen sollen sinnvolle Möglichkeiten der Energieeinsparung aufgezeigt werden. Auf diese Forderung wurde bereits in der Einleitung dieser Arbeit eingegangen.

### 3. Spritzgießmaschinen: Grundlagen und Energiebilanzierung

In diesem Kapitel wird speziell auf ein Kunststoffformgebungsverfahren, das Spritzgießen, eingegangen. Auf dieses Verfahren stützt sich die gesamte weitere Arbeit. Angefangen mit dem Aufbau der Spritzgießmaschine werden der Spritzgießprozess und eine anschließende Energiebilanzierung beschrieben.

#### 3.1 Spritzgießmaschine

Die Spritzgießmaschine beinhaltet das Kunststoffgranulat, auch Formmasse genannt, oben in ihrem Trichter. Dieser befindet sich über der Schnecke, der sog. Spritzeinheit, in welche das Granulat, genannt Formmasse beim Dosieren einfällt. Die Schnecke befördert die Formmasse durch den Zylinder, welcher in verschiedene Zonen eingeteilt werden kann. „Die Formmassen werden durch Konvektion (Wärmeübergang von Zylinderwand zur Formmasse) und durch Scherwärme aufgeschmolzen“ [26]. Vorne, an der Spitze hat die Formmasse einen Schmelzustand erreicht. „Die erreichte Temperaturhomogenität liegt je nach Dosierweg zwischen +5 bis 30 K“ [26]. Johannaber beschreibt die axiale Inhomogenität um den Faktor 2 bis 3 größer als die mediale. Wird das Werkzeug geschlossen, entsteht eine Verbindung zwischen dem Werkzeug und der Düse mit der sog. Schließkraft. Es erfolgt nach einer eingestellten Zeit in der Steuerung der Vorgang Einspritzen mittels eines mechanisch oder hydraulisch aufgebrachtens Drucks zwischen 140 bis 210 bar auf die Schneckenkolbenfläche. **„Vor der Schnecke wirkt ein Druck (spezifischer Spritzdruck), dem Flächenverhältnis von Hydro-Kolbenfläche und Schneckenkolbenfläche entsprechend“** [26]. Nachfolgende Abbildung beschreibt den Aufbau [aus 91]:

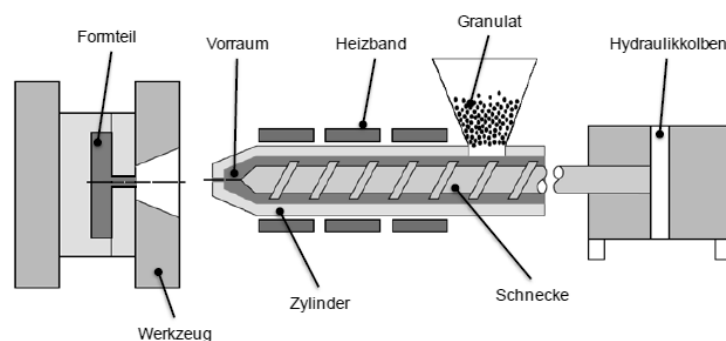


Abbildung 17: Spritzgießmaschine, schematischer Aufbau

Zwischen dem Hydraulikdruck und dem spezifischen Spritzdruck liegt ungefähr ein Übersetzungsverhältnis mit dem Faktor 10. Viele große Spritzgießmaschinen fahren den Prozess mit

einem Druck von ca. 1500 bis 2300bar. „In der temperierten (gekühlten) Kavität erstarrt die Schmelze (Thermoplasten), härtet aus (Duroplasten) oder vulkanisiert (Kautschuk)“ [23]. Das Werkzeug öffnet sich nach der Kühl- oder Härtezeit, der sog. Vulkanisierzeit und das Formteil wird ausgeworfen.

Die Spritzgießmaschine kann dem Aufbau nach in drei Teilbereiche gegliedert werden: Die Schließeinheit, die Spritzeinheit und das Maschinenbett mit der Steuerung. An der Schließeinheit sind die Aufnahme für beide Werkzeughälften, der beweglichen und festen Aufspannplatte befestigt. Die Schließeinheit setzt die Bewegungen des Werkzeugs und des Auswerfsystems um sowie das Aufbringen der Zughaltekraft, die entgegen der Werkzeugauftriebskraft wirkt. Aus der Spritzeinheit wird die zu verarbeitende Polymerschmelze gedrückt. Das Polymer wird zum einen durch die seitlich angebrachten Heizbänder, zum anderen auch durch die Friktion, die durch die Drehbewegung der Schnecke im Zylinder entsteht, auf eine sog. Verarbeitungstemperatur erwärmt. Es werden für die Rotation abhängig vom Materialeinsatz unterschiedliche Schneckenformen verwendet, wobei oft die sog. Dreizonenschnecke ausgewählt wird. Beim Dosieren wird das Material eingezogen und durch die Schneckenrotation vorn an die Spitze gedrückt. Außer einer Radialbewegung wird die Schnecke gegen einen sog. Staudruck axial gedrückt. Durch vorkommende Dekompression wird das ganze System vor der entlastet. Beim Einspritzen wirkt die Schnecke als eine Art Kolben und das Zurückfließen der Masse wird durch eine sog. Rückstromsperre verhindert. Das o.g. Maschinenbett verbindet Schließeinheit und Spritzeinheit und muss den hohen Drücken und Kräften standhalten können, damit keine Verformungen auftreten. Das Bedienfeld der Steuerung der Maschine dient zur Eingabe und Überwachung der Prozessparameter, dazu gehören die Überwachungen der Qualitätsparameter, sowie Zeit-, Druck- und Volumenparameter. Werkzeuginnendruckaufnehmer und weitere Temperaturfühler können mit geeigneter Software Toleranzen des Werkzeuginnendrucks und des Masseverlaufs im Werkzeug messen [15].

## 3.2 Spritzgießprozess und Prozessparameter

Spritzgießprozesse dienen der Herstellung von Kunststoffteilen aus Thermoplasten, Elastomeren oder Duroplasten. Die Schmelze wird durch die Düse in das Werkzeug und in einen darin enthaltenen Hohlraum **unter bestimmten Prozessgrößen** gespritzt. Es folgt die Reaktion der Schmelze und der Kunststoff wird nach der Abkühlung entformt. Das Spritzgießwerkzeug und die Spritzgießmaschine sind die eigentlichen formbestimmenden Bestandteile, welche auch als Formgebungseinheit beschrieben werden. Die Literatur berichtet, dass funktionell schon seit 1872 „das Aufschmelzen von Kunststoffen unter Einwirkung von Wärme in einem Zylinder-Kolbensystem[...]“ [11] stattgefunden hat. Außerdem wurde die Kunststoff-Schmelze ebenso unter hohem Druck in eine Kavität gebracht,

„[...]in eine formgebende gekühlte Werkzeughöhlung[...]“ [11]. Das Produkt kühlt in der Form ab, es kann jedoch noch ausgeformt werden.

Die folgende tabellarische Aufstellung beschreibt den Ablauf in den einzelnen Prozessschritten beim Spritzgießen und auch deren Einstellparameter:

Ablaufschritt	Einstellparameter der SGM
Temperatur Nachregelung	Werkzeugtemperatur, Zylindertemperatur, Heißkanaltemperatur
Schließen des Werkzeugs	Schließgeschwindigkeit, Schließprofil, Zuhaltkraft
Einspritzvorgang	Einspritzgeschwindigkeit, Geschwindigkeitsprofil
Nachdruckphase	Zeit, Druck, Nachdruckprofil, Umschaltepunkt
Plastifiziervorgang	Plastifiziergeschwindigkeit, Straudruck
Kühlzeit (Puffer)	Zeit
Auswerfer vor	Geschwindigkeiten, Kräfte, Vorfahrprofil
Auswerfer zurück	Geschwindigkeiten, Kräfte, Rückfahrprofil
Werkzeug öffnen	Öffnungsgeschwindigkeiten, Öffnungsprofil
Teilausfall	Zeit bis zum erneuten Schließen des Werkzeugs

Tabelle 2: Ablaufschritte und Einstellparameter, grundsätzliche Abfolge

Bei einer Spritzgießmaschine können für ein ursprüngliches Verfahren die Parameter auf verschiedenste Weise eingestellt werden. Demnach können die Prozessparameter theoretisch beliebig ausgewählt werden um Kunststoffteile herzustellen, jedoch wird die Qualität der Produkte dann außer Acht gelassen. Die Einflussgrößen sind in o.g. Tabelle 2 dargestellt.

Ist das Werkzeug geschlossen, wirkt die Zuhaltkraft auf das Werkzeug und die Maschine leitet mit dem Vorschub des Aggregats den Einspritzvorgang ein. Dieser Vorschub endet, wenn die Düse das Werkzeug berührt. Sie liegt schließlich mit dem Düsenanlagedruck am Werkzeug an. Nun wird die Masse mit einer vorher definierten Prozessparametern, der Einspritzgeschwindigkeit und dem Einspritzdruck in das Werkzeug gespritzt. Es folgen Nachdruck und zugleich Restkühlzeit, welche Einfluss auf Wandstärke und die Qualität des Produktes haben. Einfluss auf die Kühlzeit haben der eigentliche Werkzeugaufbau und dessen Kühlung. In dieser Kühlzeit startet der Dosiervorgang für den folgenden Prozess und es folgt Entlastung auf die Schnecke. Nach dem Prozess kann das Aggregat zurückgefahren werden und zwischen der Düse und dem Werkzeug findet keine Wärmeübertragung mehr statt. Ist die Kühlzeit beendet, öffnet sich das Werkzeug und das Teil wird

aus der Form mittels Auswerfer herausgedrückt. Es folgt der nächste Zyklus mit „Werkzeug schließen“ [8, 26, 51]. Abbildung 18 zeigt die Prozessschritte mit unterschiedlichen Farben markiert.

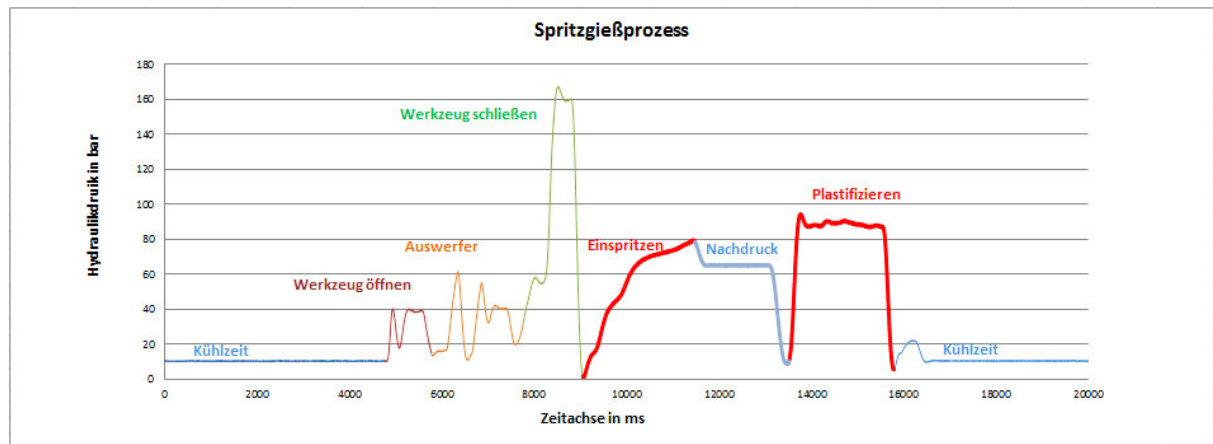


Abbildung 18: Prozessablauf Spritzgussmaschine, Hydraulikdruckverlauf

## Prozessgrößen

Einstellgrößen beeinflussen die Qualität der Produkte und den Ablauf der Produktionsprozesse. Die Maschinenparameter müssen korrekt aufeinander abgestimmt sein. Die Einstellung der Größen Hydraulikdruck und Geschwindigkeit sind anhand der Reihenfolge der Prozessschritte im o.g. Spritzgießprozess festgelegt. Im Folgenden sollen Ursache und Wirkung dargestellt werden.

Temperatureinstellungen der Heizzonen, sowie der Düse sind als erste Einflussgrößen zu nennen. Besitzt das Werkzeug ebenfalls Heizelemente, sind diese ebenso den Einstellparametern hinzuzufügen. Die notwendigen Temperatureinstellungen sind den Datenblättern der verschiedenen Kunststoffe zu entnehmen. Die Kühlung des Werkzeugs, d.h. der Aufbau der Kühlung (Rohr- oder Plattenkühlung) und die Abkühldauer beeinflussen Wandstärke des Produktes, die Zykluszeit und die Oberflächenbeschaffenheit des Materials.

Das Werkzeug wird zu **Beginn des Zyklus** zusammengefahren. Es wirkt die **eingestellte Schließkraft** auf das Werkzeug. Die Fahrbewegung wird mit **eingestellter Schließgeschwindigkeit** vorgenommen. Das Werkzeug wird anschließend mit der **eingestellten Zuhaltkraft** (eigentl. Druckeinstellung) zusammengedrückt und -gehalten.

Bei dem darauf folgenden **Einspritzvorgang** ergibt sich die **Einspritzzeit** aus der **Einspritzgeschwindigkeit**, dem sog. **Einspritzdruck** sowie dem festgelegten **Umschaltpunkt**. Beim Einspritzen in das Werkzeug wirkt der Strömung ein Fließwiderstand entgegen. In den Datenblättern ist von einer Fließzahl der Kunststoffe die Rede, welche im Praxisteil noch erläutert wird. Um die oben genannte Einspritzgeschwindigkeit erreichen zu können, muss ein Einspritzdruck an der Düse

aufgebaut werden. Drei Barrieren [26] müssen vom Druck überwunden werden: der Fließwiderstand in der Düse und der Fließwiderstand im darauf folgenden Angussystem. Beide Systeme sind bei schwankenden Temperaturen und Stoffeigenschaften konstant. Mit zunehmendem Fließweg steigt als dritte Schwierigkeit aber auch der Fließwiderstand selbst, welcher von der Schmelze auf dem Weg in das Werkzeug zu überwinden ist. Die Parameter, welche für den Einspritzvorgang gewählt werden, haben großen Einfluss auf die Qualität der Teile und sind beim Einrichten der Maschine vor der Produktion sorgfältig auszuwählen.

Es folgt der Umschaltzeitpunkt vom Einspritzen zum Nachdruck. Die genaue Position kann mit einer Versuchsreihe ermittelt werden. Maschinenhersteller geben außerdem auch die genauen Punktpositionen an. Die Umschaltung kann weg-, druck- oder zeitgesteuert erfolgen. Die Einspritzgeschwindigkeit bis zur Nachdruckphase hat Einfluss auf den Kunststoffformgebungsprozess. Es können bei hohen Geschwindigkeiten verschiedenste Gratbildungen, Verbrennungen oder Oberflächenfehler im Ausgussbereich entstehen. Bei zu niedrigen Geschwindigkeiten kann beispielsweise das Teil nicht voll ausgespritzt werden, da die Erstarrung schon vorher stattfindet.

**Beim Dosiervorgang** bestimmen die **Dosierzeit** durch das vorgegebene **Dosiervolumen**, die **Dosiergeschwindigkeit**, der **Staudruck** und die **Dekompression** den Prozess. Das Granulat erfährt beim Dosiervorgang die notwendige Wärmezufuhr von den o.g. seitlich angebrachten Heizbändern und der Friktionswärme durch die Rotationsbewegung. „Die Homogenität der Schmelze hat einen sehr großen Einfluss auf die Qualität der Teile und ist in hohem Maße von der Auslegung der Schnecke abhängig“ [9]. Der Staudruck ist ein weiterer qualitätsbestimmender Parameter, welcher die Qualität der Teile bestimmt. Er wirkt axial während der Dosierzeit auf die Schnecke. Zum Ausgleich der Volumenschwindung bei der Erstarrung der Schmelze muss das Dosiervolumen ausreichend groß gewählt werden. Wird aber für die verwendete Schneckengröße ein zu hohes Dosiervolumen angesetzt, kann die Schmelze inhomogen werden und es können Einzugsprobleme entstehen. Wird für das Dosiervolumen eine zu geringe Einstellung bezüglich der Schneckengröße gewählt, treten zu hohe Verweilzeiten im Schneckenorraum auf. Das Material wird zu langsam transportiert und wird darauf thermisch geschädigt.

Die Homogenität der Masse im Zylinder wird durch den Massedruck, d.h. letztendlich durch den Staudruck selbst bestimmt. Die Scherwärme kann demnach vergrößert werden, wenn der Staudruck erhöht wird. Die Schmelze erfährt bei höherem Druck im Schneckenorraum eine höhere Erwärmung.

Außer der Staudruckhöhe hat auch die Dosiergeschwindigkeit Einfluss auf den Friktionsvorgang. Die Geschwindigkeit darf die vom Hersteller vorgegebenen Angaben nicht überschreiten und ist auf die Restkühlzeit auf jeden Fall anzupassen.

Hat der Einspritzvorgang begonnen, startet mit dem Austreten aus der Düse eigentlich schon die Kühlzeit. Das Material muss demnach schnell in die Form gespritzt werden um nicht vorher zu erstarren. Die Verweilzeit im Werkzeug nach der Ausbildung ist aber notwendig um Verformungen beim Auswerfen und Beschädigungen des fertigen Produktes durch Auswerferstifte zu vermeiden.

Die notwendige Zykluszeit für eine geforderte Produktqualität setzt sich somit aus den einzelnen Messzeiten zusammen, wie

- Einspritzzeit,
- Nachdruckzeit,
- Restkühlzeit
- und Entformungszeit.

Viele Einflussgrößen im Herstellungsprozess eines Kunststoffteils beeinflussen den Formgebungsprozess. Diese Stellschrauben müssen aufeinander abgestimmt sein, um fähige Produktionsprozesse zu gewährleisten. Nur dadurch können Kunststoffhersteller den Qualitätsansprüchen ihrer Kunden gerecht werden [8, 15, 51].

Die Einspritzparameter sind von den Einflussgrößen abhängig wie:

- der Geometrie der Teile,
- dem verarbeiteten Werkstoff,
- der Werkzeugkühlung,
- der Art und Menge der Füll- und Verstärkungsstoffe und
- dem Werkzeug.

Der Spritzgießprozess wird nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ beurteilt. Der Kunde wünscht beim Kauf eines Produktes eine gute Haltbarkeit sowie gute optische Eigenschaften. Wesentliche Erscheinungsmerkmale und Materialeigenschaften sind dafür zu definieren.

Der Einspritzvorgang hat wie schon oben genannt wichtige Einflüsse auf die Eigenschaften des Formteils. Die folgende Abbildung [26] stellt die optischen Erscheinungen des Formteils dar, welche die Qualität des Produktes definieren:



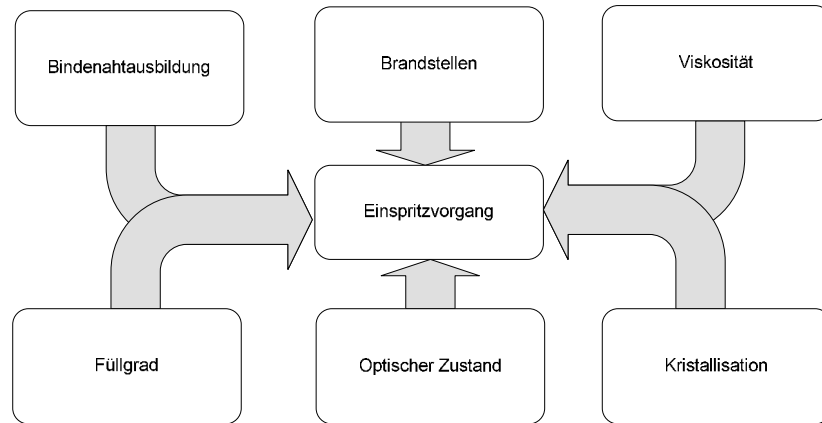


Abbildung 19: Einflussgrößen auf den Einspritzvorgang

Die oben aufgeführten Eigenschaften machen eine genaue Darstellung der Einflussgrößen notwendig.

### 3.3 Energiebilanzierung: Betrachtung elektrischer Energiezufuhr

Für die Aufnahme und Bewertung der Energieeffizienz einer Spritzgießmaschine wird in der Literatur ausschließlich die elektrische Komponente herangezogen, wie z.B. bei Zahoransky [67]. Auch in der Spritzgießverfahrenstechnik wird die Energie wie auch im vorangegangenen Grundlagenteil als Produkt von Strom und Spannung definiert und noch einmal multipliziert mit der Zeiteinheit. Demnach ist der Begriff der elektrischen Energie auch in diesem Fall zusammengesetzt aus nachfolgenden physikalischen Größen:

$$dW = U * I * dt \quad \text{oder} \quad W_{el} = P * t_z \quad (3.1)$$

$$P = U * I * \cos\varphi \quad (3.2)$$

$$W = \frac{\sum W}{m_h} \quad (3.3)$$

$$m_h = \frac{m_t * 3600s * t_h}{t_z} \quad (3.4)$$

mit

$W \rightarrow$  elektrische Arbeit [kWh]

$P \rightarrow$  Leistung [W]

$U \rightarrow$  Klemmspannung [V]

$I \rightarrow$  Strom [A]

$m_h \rightarrow$  Massedurchsatz in einer Stunde [kg/h]

$m_t \rightarrow$  Schussgewicht [kg]

$w \rightarrow$  spezifische Energie [kWh/kg]

$t_z \rightarrow$  Zykluszeit [sek.]

$t_h \rightarrow$  Zeit in Stunden [h]

$\cos\varphi \rightarrow$  Leistungsfaktor

### 3.4 Energiebilanzierung: Betrachtung der Formänderung im Prozess

Den schlechtesten Wirkungsgrad stellt die hydraulische Antriebsweise dar. Jedoch ist es standortabhängig, ob diese Antriebsweise dennoch genutzt wird, trotz ihrer schlechten Effizienz. Deshalb wird in dem kommenden Versuchsteil der Schwerpunkt auf die hydraulische Antriebstechnik gelegt. Das Umsetzen der elektrischen Energie (Motor) in den Hydraulikantrieb (Hydraulikpumpe) erfordert ein hohes Maß an Energie, welche in einer bestimmten zunehmenden Menge in Form von Druck auf den Hydraulikzylinder abgegeben wird. Abbildung 18 auf Seite 42 deutete den Verlauf des Spritzgießprozesses schon an.

In der Einspritzphase (bis zur ersten Spitze) kann man Einflüsse der Reibungswiderstände, den Strömungswiderständen der Spritzeinheit in der Düse selbst und im Angussteil erkennen. Durch eine hohe Schmelzviskosität wird der Druckverlauf ebenso beeinflusst wie auch von der Füllzeit. Es entsteht ein Druckabfall, welcher zur Folge hat, dass das Formteil vollständig mit dem zähen Kunststoff gefüllt ist. Dieses macht sich auch in der Einspritzgeschwindigkeit bemerkbar, welche langsamer wird. Diese genannten Einflussgrößen können hier sehr stark eine Veränderung des Druckes nach oben oder nach unten hervorrufen [26]. Bis zum Erreichen des Füllstandes steigt der Druck beim Einspritzen. Dieses ist an der Einspritzkurve zu erkennen (Abb.18, S.42). Dieser Füllpunkt äußert sich mit einem starken knickartigen Abfall von Werkzeuginnen- und Hydraulikdruck beim Übergang in die Nachdruckphase [26]. Bevor der Füllpunkt vollständig ausgebildet ist, sollte die Einspritzkraft richtig eingestellt sein, damit von hoch eingestelltem Einspritzdruck auf niedrigerem Nachdruck umgeschaltet werden kann. Es folgt eine Druckspitze nach dem Einspritzen, welche sogar vom Umschaltzeitpunkt und dem Einspritzdruck abhängt. Falls im Werkzeugdruckverlauf diese Druckspitze auftauchen sollte, wurde der Zeitpunkt des Umschaltens zu spät gewählt[26].

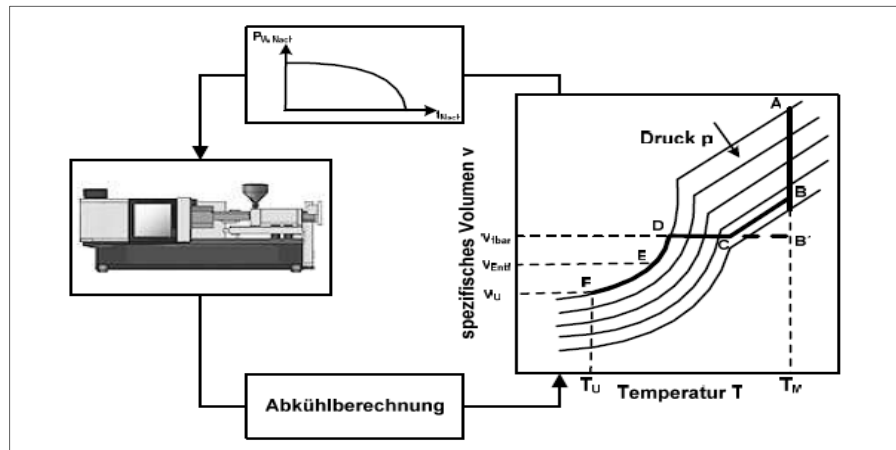


Abbildung 20: pvt-Diagramm Thermoplaste

In dem pvT-Diagramm [aus 57] werden die Prozesse in einzelne Phasen eingeteilt und wie folgt beschrieben:

- A-B: Einspritzvorgang und Nachdruckumschaltung
- B-C: Nachdruckphase, Masse fließt weiter
- C: Anguss erstarrt
- C-D: Abkühlung, isochorer Vorgang
- D: Umgebungsdruck wird erreicht, Bauteilgewicht wird festgelegt
- D-E: Schwindung bei Verarbeitung
- E-F: Umgebungstemperatur wird erreicht, Abkühlungsphase

Gruber [17] und auch Johannaber [26] beschreiben eine Regelung des Werkzeuginnendrucks, welche sich aus diesen o.g. Phasen ergibt. Die Schneckenvorlaufgeschwindigkeit ist dafür verantwortlich durch bestimmten Vorschub den Werkzeuginnendruck zu regeln. „Zur Regelung der Schneckengeschwindigkeit wird ein prädikativer Regler verwendet, der auf einem künstlichen neuronalen Netz basiert“ [36, 49]. Nach Johannaber [26] werden vier Arten von Umschalten von Einspritz- auf Nachdruck festgelegt: 1. Wegabhängig, 2. Zeitabhängig, 3. Werkzeuginnendruckabhängig und 4. Hydraulikdruckabhängig.

### 3.5 Energiebilanzierung: Bilanz formbestimmender Prozessschritte

Um die Spritzgießvorgänge zu charakterisieren, müssen Kennzahlen für den jeweiligen Prozess hergeleitet werden. Es wird nach Berechnungsmethoden gesucht, welche die Energiegrößen eines Spritzgießprozesses in Beziehung setzen und gleichzeitig mit ihrem Wert über eine schlechte oder gute Energieeffizienz Aussage treffen können. Diese Prozesszahlen basieren auf Arbeits- oder mittleren Leistungswerten, welche durch Integration berechnet werden. Um diese Prozesszahlen

später in einer absichtlichen Parameteränderung miteinander vergleichen zu können bedarf es eines konstanten Maschinenbetriebs [49].

Die Unternehmen in der Kunststoffindustrie verfolgen nebenher das Ziel, leichte Bewegungsvorgänge zu schaffen. Diese könnte den Produktionsprozess durch eine kürzere Zykluszeit beschleunigen. Wird auf bisherige Arbeiten zu diesem Thema zurückgegriffen, werden immer wieder zwei Teilprozesse des Spritzgießzyklus in den Vordergrund gestellt.

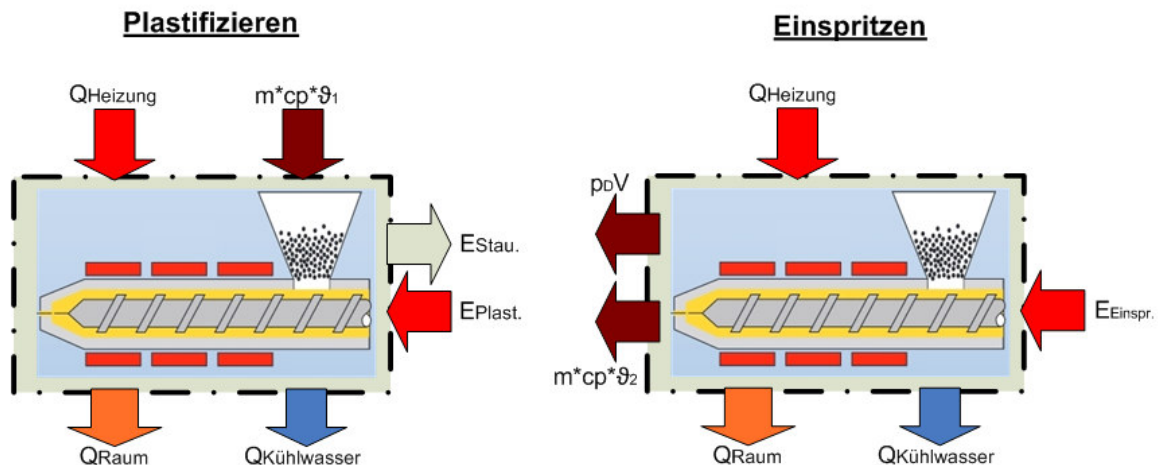


Abbildung 21: Energiebilanz der Spritzgieß-Teilprozesse

Die Abbildung 21 [aus 33] zeigt Energiebilanzen für den Einspritz- und Plastifiziervorgang, wie sie von Jiqing Liu in seiner Dissertation vorgestellt werden. Diese Energiebilanzierung berücksichtigt den eigentlichen Formprozess und bedarf somit keiner weiteren Untersuchung, denn das Thema wird in dieser Dissertation ausführlich behandelt.

Beschrieben wird ebenso in seiner Dissertation die Dissipationsenergie, bei der die Granulatkörner mit der Schnecke in die Spritzeinheit eingezogen, nach vorne gefördert sowie aufgeschmolzen werden. Die dabei auftretenden Schubspannungen wirken wie ein Widerstand gegen die Rotationsrichtung und bewirken eine Erwärmung auf der einen Seite und eine Zunahme der Arbeit des elektrischen Antriebes auf der anderen Seite. Vorgestellt wird die Gleichung 3.7, Seite 50. Würde ein hydraulischer Antrieb betrachtet werden, würde die Dissipationsenergie als mechanische Energie über das Drehmoment der Schnecke in das System eingebracht werden. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird genau dieser Antrieb im Vordergrund stehen und nicht die Kunststoffformgebung.

### 3.5.1 Berechnung der Plastifizierarbeit

Der Plastifiziervorgang wird durch die Plastifizierarbeit [26] beschrieben werden, die der Dosiermotor aufwenden muss. Die Formel ist abgesehen von der Bezeichnung „Plastifizierarbeit“ identisch.

$$E_s = P_s * t_p \quad (3.5)$$

wobei  $P_s$  die Schneckenantriebsleistung und  $t_p$  die Zeit für den Plastifizierungsvorgang ist.

### 3.5.2 Berechnung der Einspritzarbeit

„Die Einspritzarbeit [...] ermittelt man als Integral der Kurve des Drucks über dem Einspritzweg.“ Johannaber [26] gibt dabei zwei Möglichkeiten an: Für das Integral des Hydraulikdrucks über dem Einspritzweg multipliziert mal der Einspritzkolbenfläche oder der Spezifische Spritzdruck über dem Einspritzweg mal der Schneckenkolbenfläche. Der folgende Graph [aus 26] zeigt den Druckverlauf beim Einspritzen:

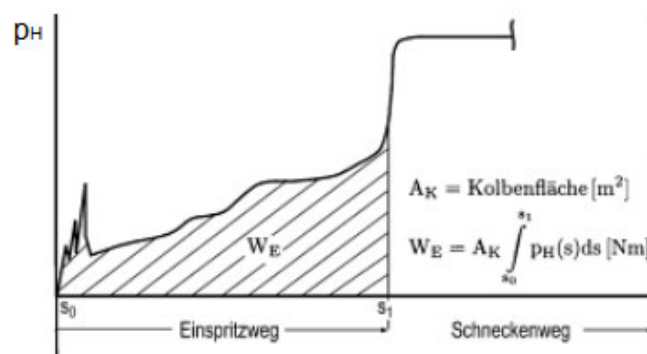


Abbildung 22: Flächenbestimmung der Einspritzarbeit

$$W_E = A_K \int_{s_0}^{s_1} P_H(s) ds \text{ [Nm]} \quad (3.6)$$

Erste Regelungskonzepte, die die Einspritzarbeit nutzen, werden in Johannaber, Lampl und Gissing [26, 31] vorgestellt.

### 3.5.3 Analyse der Energiebilanz beim Spritzgießen

Die Firma betreibt zwei verschiedene Verfahren. Extrusionsanlagen (Bsp. in der Halle 14), welche gleichmäßig Energie aufwenden um Folien für Tiefziehmaschinen herzustellen und Spritzgießanlagen (Beispiel in Halle 2 und 5), welche ungleichmäßig Energie in mehreren aufeinanderfolgenden Teilabschnitten aufwenden. Dabei werden Energieströme an den Raum und an die Umgebung abgegeben. Diese werden in Abbildung 2 auf Seite 17 kurz angesprochen. Egal welcher Vorgang

betrachtet wird, es wird immer Heizenergie dem System aus der elektrischen Heizung zugeführt. Als Kühlmedium wird immer Wasser (der Form- und der Ölkühlung) beim Spritzgießen aus dem System abgeführt.

Angefangen wird mit Bilanzgleichungen für zwei instationäre Prozesse mit Gl. 3.7 für das Plastifizieren und mit Gl. 3.8 für das Einspritzen.

$$\frac{d}{dt} Q_H + \frac{d}{dt} E_{Plast.} + \frac{d}{dt} m * c_p * \Delta\vartheta_1 = \frac{d}{dt} Q_{Raum} + \frac{d}{dt} Q_{Kü} + \frac{d}{dt} E_{stau} \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} Q_H + \frac{d}{dt} E_{Einspr.} = \frac{d}{dt} m * c_p * \Delta\vartheta_2 + \frac{d}{dt} Q_{Raum} + \frac{d}{dt} Q_{Kü} + \frac{d}{dt} p_D V \quad (3.8)$$

$$\text{mit } \Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{ref}$$

Im Falle der Integration dieser instationären Bilanzgleichungen Gl. 3.7 und Gl. 3.8 folgen Gl. 3.9 für das Zeitintervall  $t_1$  bis  $t_2$  und Gl. 3.10 für das Zeitintervall  $t_3$  bis  $t_4$ .

$$\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_H dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}_{Plast.} dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{m} dt * c_p * \Delta\vartheta_1 = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{Raum} dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{Kü} dt + \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}_{stau} dt \quad (3.9)$$

$$\int_{t_3}^{t_4} \dot{Q}_H dt + \int_{t_3}^{t_4} \dot{E}_{Einspr.} dt = \int_{t_3}^{t_4} \dot{m} dt * c_p * \Delta\vartheta_2 + \int_{t_3}^{t_4} \dot{Q}_{Raum} dt + \int_{t_3}^{t_4} \dot{Q}_{Kü} dt + \int_{t_3}^{t_4} \dot{p}_D V dt \quad (3.10)$$

Jiqing Liu [33] stellt Enthalpieänderungen des Systems in der Plastifizier- und Einspritzphase vor und anschließend folgen die zeitlich integrierten Bilanzgleichungen. Diese werden mit den folgenden Gleichungen 3.11 und 3.12 beschrieben und sind vom Aufbau für einen Spritzgießprozess immer gleich und somit auch hier zu übernehmen.

$$Q_H + E_{Plast.} + m * c_p * \Delta\vartheta_1 = Q_{Raum} + Q_{Kü} + E_{stau} \quad (3.11)$$

$$Q_H + E_{Einspr.} = m * c_p * \Delta\vartheta_2 + Q_{Raum} + Q_{Kü} + p_D V \quad (3.12)$$

[„[...]In der Literatur hat Potente [46] die Kunststoffschmelze für nicht-isotherme Vorgänge behandelt, so dass die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  des Kunststoffs unabhängig von der Temperatur  $T$  ist[...]" [33].

[...]Die vom Trichter eingezogene Masse der Kunststoffgranulate ist gleich die aus der Düse gespritzte Masse[...]" [26]. Es geht laut Nachweisen der Literatur und dort vorher durchgeführten

Versuchsreihen keine Masse verloren. Es wird hier auf die Massenbilanz Abb. 3, Seite 19 hingewiesen.

## **3.6 Wärmeübertragungsmechanismen im Werkzeug**

### **3.6.1 Aufbau der Werkzeugtemperierung**

Das Temperiersystem [28] besteht aus den Komponenten: Versorger (pumpt Temperiermedium durch das Temperierkanalsystem ins Werkzeug), dem Temperiermedium (Wärme wird durch das Medium aufgenommen, Werkzeug abgeleitet, d. h. aus dem Werkzeug wegtransportiert).

Die Korrosion ist im Bereich der Werkzeugtemperierung ein weit verbreitetes Thema. Deshalb sind die Temperiermedien mit Korrosionsinhibitoren versetzt. Wasser z.B. besitzt eine hohe Wärmekapazität und eignet sich gut zur Temperierung. Außerdem ist es günstig, schnell und ausreichend verfügbar. Auf Grund der Siedetemperatur von 99°C muss es demnach unter Druck in das Werkzeug geleitet werden.

Ebenfalls eingesetzt werden spezielle auf Öl basierende Temperiermedien. Die Wärmekapazität dieser Temperiermedien ist geringer. Das hat zur Folge, dass bei gleicher Temperierleistung eine höhere Flüssigkeitsmenge umzuwälzen ist als bei Wasser. Der Einsatz dieser Ölkühlungen findet bei höheren Temperaturen von 50 bis über 200°C statt [15].

Ein Pumpenhaus (zentral für mehrere Hallen oder dezentral (Hallenbezogen) und Temperiergeräte können als Versorgungssystem der Maschinen dienen. Temperiergeräte werden besonders bei kleinen Industriebetrieben verwendet (auf Grund der nichtlohnenden Größe für Pumpenhäuser) oder bei warm gefahrenen Werkzeugen. Die Temperaturen können an dem Temperiergerät variiert werden. Kontinuierlich wird die Temperatur des umlaufenden Mediums geregelt. Die Temperiergeräte neuerer Bauart sind sehr oft auch servogeregelten Pumpen ausgestattet. Diese Regelung hat den Vorteil, dass die Leistungsaufnahme nur mit zunehmender Pumpenauslastung ansteigt. Eine Reduzierung der Durchflussmengen kann somit eine Reduzierung des Energieverbrauchs durch diese Regelung bewirken [28].

Zentrale Pumpenhäuser bieten den Maschinen den Vorteil, nicht jede Maschine einzeln extern temperieren zu müssen. Somit ist ein Einsatz einzelner Temperiergeräte nicht notwendig. Die Versorgungsleitungen für die zentrale Wasserversorgung verlaufen bei der in dieser Arbeit betrachteten Firma unterirdisch. Alle Maschinen sind mit 1 Zoll Leitungen an das Zentralleitungsnetz verbunden. Jede Maschine besitzt Wasserverteiler, die bestehend aus einem Aluminiumblock, mit der Wasserleitung verbunden sind. Die Temperatur des Mediums wird über Wärmetauscher gekühlt und auf einem bestimmten Temperaturniveau konstant gehalten. In den Wasserleitungen entstehen

durch ihre lange Verlegung Wärmeverluste. Deshalb wird eine Betriebsweise mit kaltem Wasser bevorzugt. Voraussetzung für eine konstante Werkzeugwandtemperatur ist eine konstante Kühlleistung, damit wird eine ausreichende Heiz-, Kühl- und Pumpenleistung (Druck und Durchfluss) des Versorgersystems gewährleistet. Empfohlen wird die Verwendung möglichst kurzer Schlauchleitungen mit großem Durchmesser um die notwendige Pumpenleistung aufgrund von Druckverlusten so gering wie möglich zu halten.

### 3.6.2 Kühlkanäle, Kühlmedium und Durchfluss im Werkzeug

Die Abbildung 23 skizziert die Position der Kühlkanäle im Werkzeug. Ziel sind die möglichst konturnahen Bohrungen, die für eine effektive Kühlung sorgen [28]. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Werkzeug ist eine Plattenkühlung mit zwar großen Kühlflächen jedoch ohne spezielle Berechnungsvorgänge bei der Entwicklung eingebaut. Auch bei anderen Werkzeugen geschieht dieses standardmäßig ohne eine Berechnung des Wärmeüberganges. Die gesamte Auslegung der Kühlungseigenschaften basiert auf Erfahrungswerten und wird nur in den seltensten Fällen berechnet. In das Werkzeug eingebrachte Auswerfer oder Sensoren schränken die möglichen Positionen der Kühlkanäle erheblich ein und behindern so eine optimale Wärmeabfuhr [15]. Im Ausblick der Arbeit wird auf dieses Problem mit dem Projekt Durchflussreduzierung noch einmal eingegangen. Der Werkzeugbau der Firma gibt als aktuellen Stand der Entwicklung die Verwendung moderner Fertigungstechniken, wie neue Lötverfahren und Trennverfahren mittels Laser, an. Mit diesen Verfahren lassen sich der Kühlungseigenschaft dienlich bessere Oberflächen im Kühlkanal realisieren [28]. In Untersuchungen hat von Kölln eine Temperaturdifferenz zwischen Einlauf und Rücklauf von möglichst drei Grad und fünf Grad angegeben [28]. Das wird in seinen Tests belegt, welche durchgeführt werden, um die Wärmeverteilung in einem Werkzeug zu untersuchen. Forderungen sind dabei ein ausreichend großer Durchmesser, eine große Temperierkanaloberfläche für den Wärmeübergang und ein geringer Druckabfall für die Temperiermittelförderung. Die Abbildung 23 [aus 15] zeigt den Werkzeugaufbau als Beispiel.

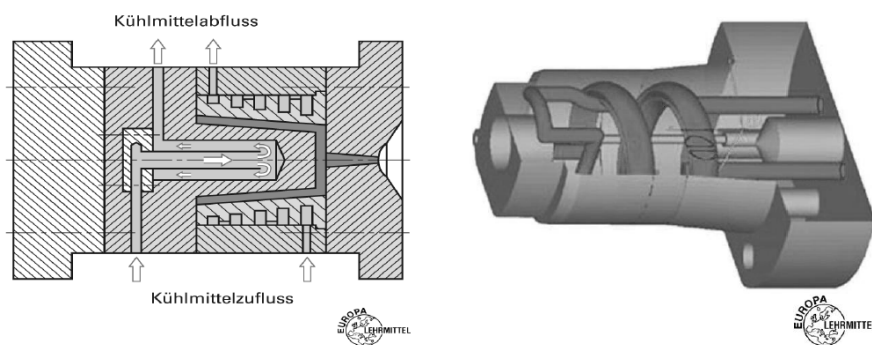


Abbildung 23: Aufbau des Werkzeugs mit Kühlmitteldurchlauf



Versuche haben in der eigenen Firma ergeben, dass Druckschwankungen erhebliche Auswirkungen auf die Produktqualität haben, so von Kölln [28]. Der Temperaturverlauf ist bei einem Zyklus nicht gleichmäßig sondern schwankt während des Einspritzens und der Kühlphase von oben nach unten und wieder nach oben. „Nach einer gewissen (ungestörten) Einfahrzeit stellt sich eine mittlere Werkzeugwandtemperatur ein[...]“ [28]. Die ersten Teile, welche aus der Maschine geliefert werden, werden durch die Steuerung noch nicht freigegeben und sind somit Ausschuss. Dieses zeigt in moderner Produktion auch eine orange Kontrollleuchte an den Maschinen an. Der Kunde erhält somit nur Produkte, welche in einem Zyklus konstanter Temperierung gefahren werden.<sup>5</sup>

Die Temperaturdifferenz, hier in Abbildung 24 als  $\Delta\vartheta$  dargestellt, befindet sich zwischen der Temperierflüssigkeit und der Innenwand der Form. Einflussgröße sind der Wärmeleitwiderstand des Stahls, und der konvektive Wärmeübergangswiderstand zwischen dem Werkzeug und der Temperierflüssigkeit [28]. Folgende Abbildung [nach 38] beschreibt den Temperaturverlauf im Werkzeug und berücksichtigt die Größen Wärmeübergangswiderstand und Wärmeleitwiderstand.

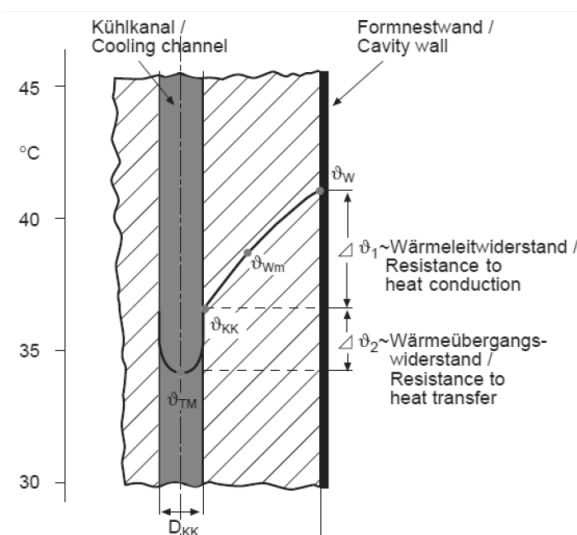


Abbildung 24: Strömung durch Kühlkanal

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  bestimmt das Maß für den Wärmeübergang. Findet ein besserer Wärmeübergang statt, kann die Wärme in einem Werkzeug besser vom Temperiermedium abgeführt werden.

Die Formel Wärmeübergangskoeffizient beschreibt sich zu:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (3.13)$$

<sup>5</sup> Die Anfahrversuche wurden bereits in dem Labor durchgeführt und können bestätigt werden.

mit

$\alpha \rightarrow$  Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>\*K]

$\lambda \rightarrow$  Wärmeleitfähigkeit des Fluids [W/m\*K]

$L \rightarrow$  Charakteristische Länge [m]

Die Nußeltzahl ist Teil der oben genannten Formel des Wärmeübergangskoeffizienten. Für eine turbulente Rohrströmung wird sie gebildet durch:

$$Nu = 0,023 * Re^{\frac{4}{5}} * Pr^{\frac{1}{3}} \quad (3.14)$$

mit

$Re \rightarrow$  Reynoldszahl [dimensionslos]

$Pr \rightarrow$  Prandtzahl [dimensionslos]

Die Formel Prandtzahl beinhaltet die spezifische Wärmekapazität und die Viskosität des Fluids:

$$Pr = \frac{\eta * cp}{\lambda} \quad (3.15)$$

mit

$\eta \rightarrow$  Viskosität des Fluids [N\*s/m<sup>2</sup>]

$\lambda \rightarrow$  Wärmeleitfähigkeit des Fluids [W/m\*K]

$cp \rightarrow$  Wärmekapazität des Fluids [kJ/kg\*K]

Die Formel für die Reynoldszahl bezieht sich auf die Strömungsverhältnisse in den Strömungskanälen und beinhaltet Strömungsgeschwindigkeit und Rohrdurchmesser.

$$Re = \frac{v * d * \rho}{\eta} \quad (3.16)$$

mit

$v \rightarrow$  Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

$d \rightarrow$  Rohrdurchmesser [m]

$\rho \rightarrow$  Fluiddichte [kg/m<sup>3</sup>]

Die Reynolds-Zahl ist dimensionslos und macht Aussagen über die Art der Strömung eines Mediums in einem Rohr. Bei einer gegebenen laminaren Strömung fließen die Fluidteilchen parallel und nicht senkrecht oder in andere Richtungen. Die turbulente Strömung hingegen fördert den Wechsel der Teilchen in ihrer Richtung. Es findet somit eine stärkere Wärmeübertragung statt. „Der Übergang von einer laminaren zur turbulenten Strömung findet bei  $Re=2320$  statt. Wenn gilt:  $Re>2300$ , dann ist die Strömung turbulent. Bei der Temperierung von Spritzgießwerkzeugen wird stets eine turbulente Strömung mit  $Re>10.000$  angestrebt[...]“ [28]. Die Verringerung des Durchmessers des Kühlkanals und die Verwendung eines dünnflüssigeren Mediums sowie eine höhere Geschwindigkeit des Durchflusses beeinflussen die Reynoldszahl. Auf diesen Versuch wird im Ausblick dieser Arbeit eingegangen. Der Graph [aus 68] zeigt den Übergang laminar zu turbulent.

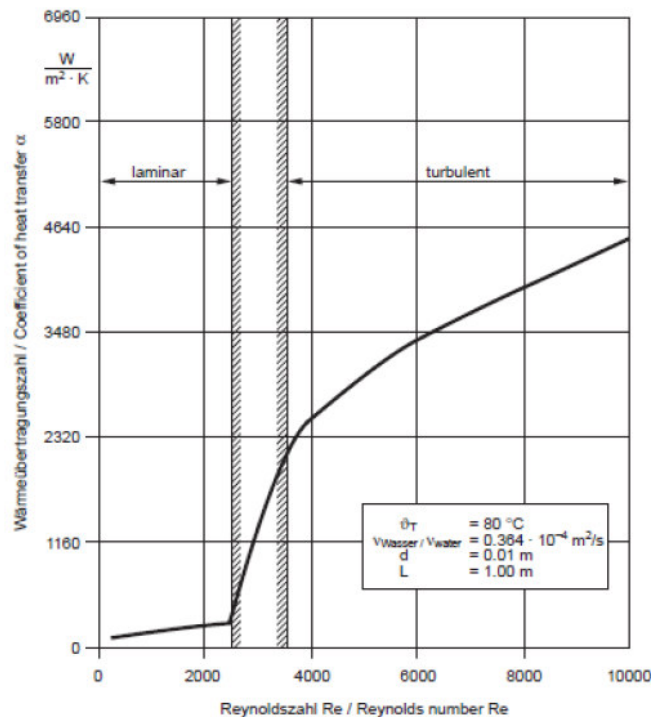


Abbildung 25: Übergang laminar zu turbulent

Untersuchungen im Vorfeld haben ergeben, dass sich in den dünnen Kühlkanälen Ablagerungen absetzen und dadurch der Wassertransport erschwert wird. Es findet dann keine ausreichende Kühlung an z.B. Rändern des Werkzeuges statt [28]. „Die daraus resultierenden Probleme werden meistens spät an der schlechten Formteilqualität erkannt“ [28].

Wird die Durchflussmenge weitaus größer über den erreichten turbulenten Zustand gefahren, ergibt sich daraus kein Vorteil mehr (Abbildung 26). Die blaue Kurve nähert sich asymptotisch der

Werkzeugtemperatur von 75°C. Hersteller weisen hier auf Einsparpotentiale hin [55]. Hingewiesen wird auf eine Untersuchung von der „International Conference on Mechatronics & Automation“ [13]. In Laborversuchen haben Wissenschaftler der Universität „New Brunswick Fredericton“ die Temperatur des Endproduktes durch die Veränderung von Einstellparametern Druck und Temperatur erhöht und auch gesenkt. Ein genauer Sollzustand wird aber nicht definiert und ist von Produkt zu Produkt unterschiedlich.

Eine erhöhte Durchflussmenge hat ab dem Bereich der Reynoldszahl größer als 10.000 keine weiteren Einflüsse auf Werkzeugwandtemperaturen. Dieses veranschaulicht der Graph 26 [aus 55].

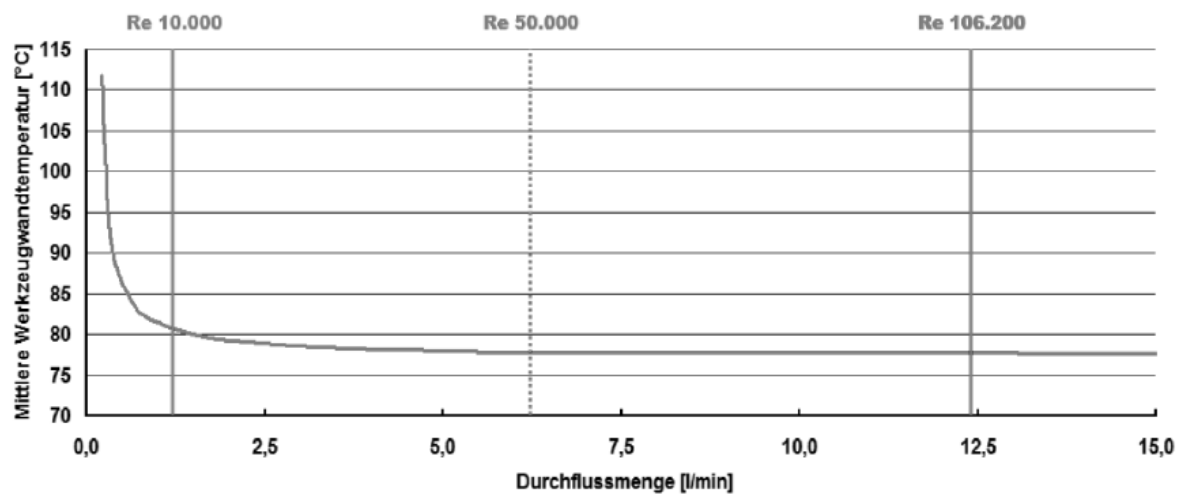


Abbildung 26: Durchflussmenge

Wird der Durchfluss in von Temperiermitteln überfluteten Abschnitten gesenkt, kann das Temperiermittel an anderen Stellen in der Produktion für weitere Maschinen oder Kühlanlagen wieder eingesetzt werden. Diese Methodik macht sich bei dem Betrieb eines gesamten Maschinenparks bemerkbar, wenn dessen Pumpenleistung des zentralen Pumpenhauses begrenzt ist. Auch innerhalb des Werkzeuges wird eine solche Zunahme des Wasserdrucks sichtbar.

## 4. Analyse des Istzustandes im betrachteten Unternehmen zur Schaffung einer Datenbasis

### 4.1 Einleitung

Zur Datenerhebung für die Istaufnahme werden die in dem Kapitel „Theoretische Grundlagen“ beschriebenen Energieformen aufgenommen und tabellarisch dargestellt. In den folgenden Abschnitten wird die derzeitige Datenaufnahme (ABC Analyse, Energiereport) im Unternehmen beschrieben, Themen aus vergangenen Diplomarbeiten vorgestellt und Eingriffspunkte für den weiteren Verlauf der Arbeit werden definiert.

Zur Wiederholung soll folgende Darstellung [23] dienen:

Energiestrom	Formelmäßige Basis	Zustands- und Prozessgrößen	Bemerkung
Elektrische Leistung	$P = U I \cos \varphi$	$U(t), I(t)$	In einem Messgerät integriert
Druckluft	$P_{DL} = \dot{V} p_{DL}$	$\dot{V}, p_{DL}$	-
Hydraulik	$P_{Hy} = \dot{V} p_{Hy}$	$\dot{V}, p_{Hy}$	-
Wärme (Konvektion)	$\dot{q}_{kon} = \alpha_{kon} (T_{Wand} - T_{amb})$	$T_{Wand}, T_{amb}$	$\alpha$ aus Tabellen bzw. Nebenrechnungen
Wärme (Durchgang)	$\dot{q} = U_{th} (T_i - T_a)$	$T_i, T_a$	$U_{th}$ aus Tabellen bzw. Nebenrechnungen
Wärme (Strahlung)	$\dot{q}_{rad, 12} = \varepsilon (T_1^4 - T_2^4)$	$T_1, T_2$	Emissionskoeffizienten in $\varepsilon$ aus Kalibrier-messungen
Wärme (Enthalpiestrom)	$\dot{Q}_h = \dot{m} c_p (T_{ein} - T_{aus})$	$\dot{m}, T_{ein}, T_{aus}$	Wärmekapazitäten aus Tabellen

Abbildung 27: Darstellung der Energie- und Leistungsformen

Bezug genommen wird auf die Energieformen der Elektrotechnik und der Thermodynamik. Hervorgehoben werden die Zustands- und Prozessgrößen der Energiegleichung. Auf die Bereiche Wärmedurchgang, Konvektion sowie die Strahlungsenergie wird im Thema Durchflussmessung noch einmal verstärkt zurückgegriffen.. Der Wärme-Enthalpiestrom wird bei der Massen-Kontinuitäts-Überprüfung eine wesentliche Rolle für den Energietransport über die Bilanzgrenze spielen. Die Druckluft ist bei den Testmaschinen nur bedingt zu betrachten, diese Komponente wird nur bei der Handlingvorrichtung verstärkt eingesetzt und fällt somit nicht ins Gewicht. Die Datenerhebungen über die Energieformen stützen sich auf die Komponenten der Spitzgussmaschine, der Kühlhäuser und der elektrischen Energieverteilungsanlagen.

## 4.2 Datenaufnahme, Zahlen aus der ABC-Analyse und Energiereport

Für die Priorisierung wird die ABC-Analyse der vergangenen Geschäftsjahre aufgestellt und ausgewertet. Diese zeigt einen starken Energieverbrauch im Bereich der Kühlhausleistung. Gegenüber der Maschinenproduktion ist diese Leistungszahl sehr hoch. Mit einer Summe von ca. 7.640.000kWh [58] ist diese Zahl höher als der Energieverbrauch und Druckluft- sowie Lüftungsbedarf der Produktionshallen zusammen. Daher sind in dieser Energiesparte Wärmeabfuhr und bereitgestellte Kühlleistung ebenso detaillierte Messungen durchzuführen wie auch in der Stromenergie. Demnach sind diese Größen in der Energiebilanz besonders zu berücksichtigen.

Energieverbrauch in kWh	Summe	Halle 3	Halle 4	Halle 5	Halle 6	Halle 12	Halle 13
Maschinen / Produktion	38.990.010	117.261	211.669	6.655.913	505.154	4.817.831	
Druckluft	4.803.968		418.045			805.742	520.038
Kältetechnik	4.748.929	14.202		510.328		486.567	
Wärme (Gas)	3.136.172	325.500	145.115	423.893	134.210	360.316	731.800
Licht	2.240.762	42.382	163.128	191.016	189.612	200.634	88.641
Materialaufbereitung	1.190.318	63.132		171.300		0	
Lüftung	838.897	0	16.387	76.231		112.934	
Büro / Sozial	237.325	23.425	33.477	8.230	13.087	24.263	20.088
Fahrzeuge	201.910	15.956	48.478	2.470		6.661	12.800
Wärme (Strom)	146.472	6.299	2.739	8.315	24.180	11.322	5.631
Abwärme vom Pumpenhaus	7.640.314			4.873.214		2.767.100	
Abwärme von Druckluftanlagen in die Hallen (WRG)	0		0			0	0
Abwärme von Druckluftanlagen nach draußen	0		0			0	0

Tabelle 3: ABC-Analyse Energieverbrauch Hallen Werk 1

Die ABC- Analyse [58] enthält wichtige Daten für den jährlichen Energiereport. In ihm sind geplante und durchgeführte Projekte sowie Maßnahmen zur Projektumsetzung enthalten. Ein Auszug dieser Projektliste wurde bereits im ersten Teil der Arbeit vorgestellt. Weitere Energieberichte (hier nicht aufgeführt) zeigen jährlich öfter vorkommende Leistungsspitzen (ähnlich der in Abbildung 14, Seite 32 dargestellten Leistungskurve). Es gilt demnach das Verhalten dieser Leistungsspitzen zu untersuchen und in einer späteren Betrachtung die Anzahl der betroffenen Maschinen. Aus den in Tabelle 3 und Abbildung 28 [58] gezeigten Daten können diese Informationen der einzelnen Maschinen nicht detailliert aufgezeigt werden. Ein Messsystem für jeden einzelnen Verbraucher ist noch nicht vorhanden.

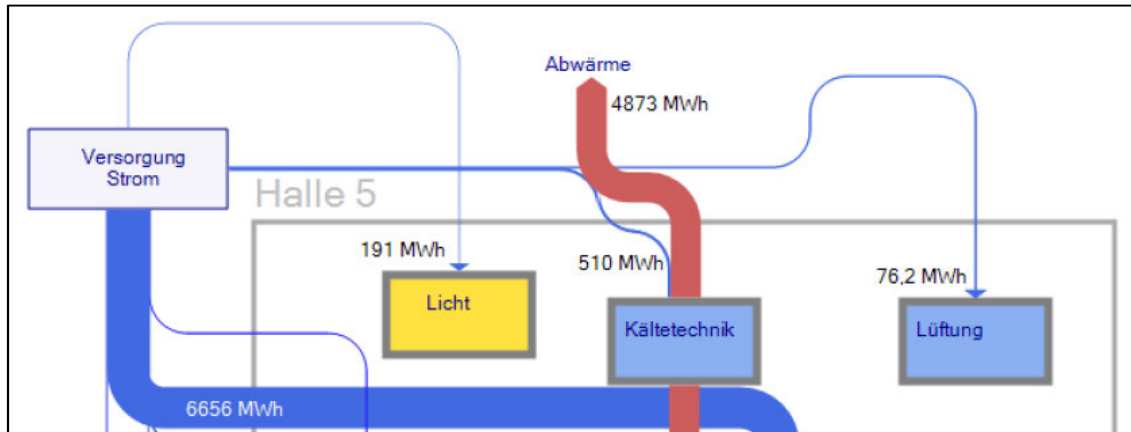


Abbildung 28: ABC-Analyse Flussdiagramm Halle 5

Die untere Abbildung 29 beschreibt die Übersicht einer Produktionshalle mit Spritzgießmaschinen. Die Maschinen sind willkürlich in Reihe in der Produktionshalle verteilt. Von jeder Maschine ausgehend sind die Komponenten: Elektrischer Strom, Formkühlung und Wasserkühlung angeschlossen. Bei Bedarf ziehen sie für Handlingapparaturen noch Druckluft aus einer zentralen Druckluftleitung.

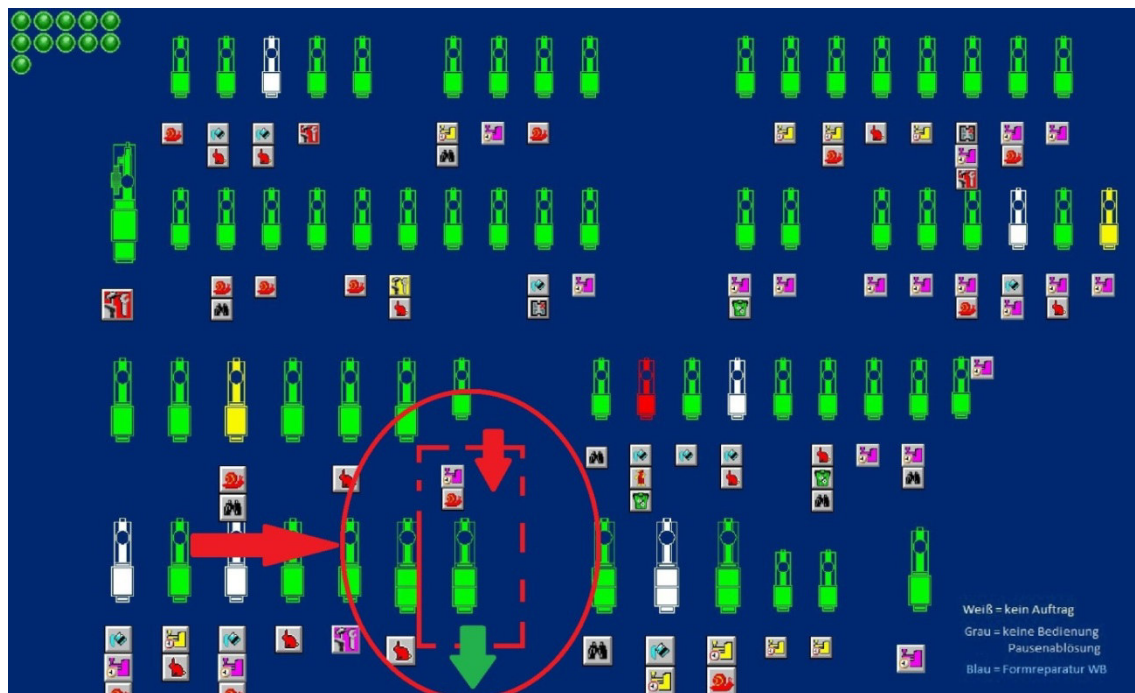


Abbildung 29: Maschinenplan Produktionshalle

Die Maschinen werden nach der Produktionsplanung mit Aufträgen versehen und als grün gekennzeichnet. In der Zeichnung wird eine Maschine hervorgehoben. Diese Maschine wird mit einer Bilanz versehen und diese mit Ein- und Ausgangsgrößen (roter und grüner Pfeil) gekennzeichnet. Für

diese Maschine (als Beispiel) liegen energietechnisch keine Daten vor. Elektrische Energie und Kühlwasser werden nur wie in Abb. 28 beschrieben hallenbezogen gemessen. Die Energiebilanzierung für eine dieser Maschinen ist nicht möglich. Die oben aufgeführte Produktionshalle besitzt viele Maschinen dieses Typs. Im derzeitigen Istzustand sind die Energiegrößen nicht einzeln erfassbar.

### 4.3 Stand der Technik und bisherige Erkenntnisse aus Diplomarbeiten

Die Unternehmen sind ständig gezwungen wegen der Ressourcenverknappung neue Wege der Energieeinsparung zu finden. Die Nachfrage und die Energiebeschaffung steigen mit dem Ausbau von Produktionshallen und globale Ereignisse sorgen für steigende Energiepreise.

Einer der wichtigen Aspekte des Energieverbrauchs bei der Verarbeitung der Kunststoffe durch das Spritzgießverfahren stellt der nachfolgende Graph [9] dar:

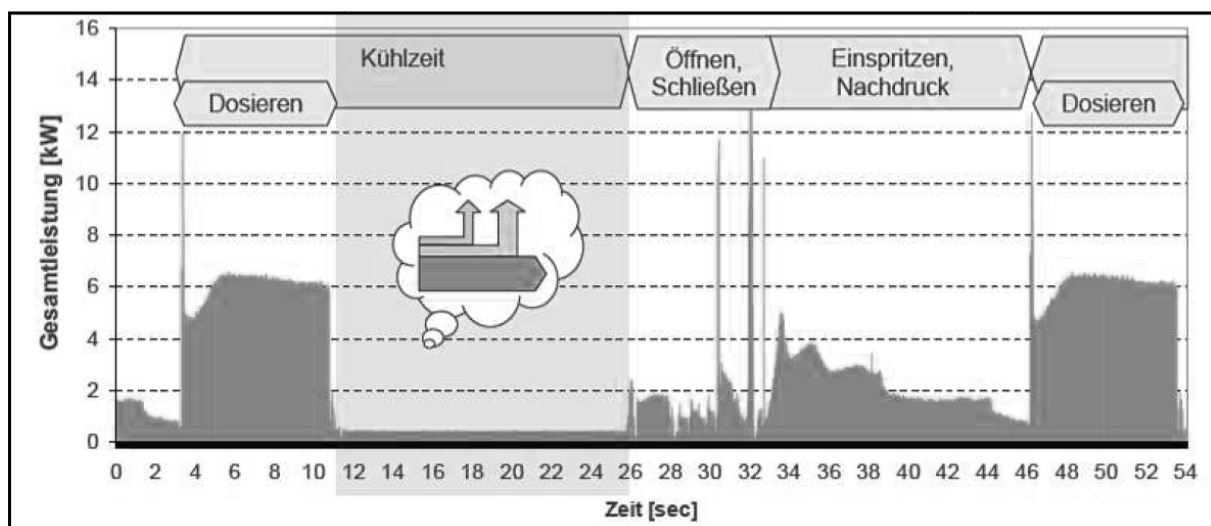


Abbildung 30: Energieverbrauch der Spritzgießphasen

Die Graphik zeigt den Energieverbrauch innerhalb eines Spritzgießzyklus und stellt Energieeinsparpotentiale dar. „Drei der energieintensivsten Bereiche sind dabei der Plastifizier-, Einspritz-, Öffnungs- bzw. Schließvorgang“ [9]. Diese Erkenntnis wird in der bisherigen Untersuchung von Brunner deutlich. Somit fällt der Untersuchungsfokus dieser Arbeit auf diese Vorgänge. In der Abbildung 30 werden die einzelnen aufeinanderfolgenden Vorgänge des Spritzgießzyklus dargestellt und ihre zeitl. Länge kann an der x-Achse abgelesen werden. Es fallen die großen Flächen im Bereich des Dosierens und Einspritzens auf. Außerdem wird die Kühlzeit (blau unterlegt) als lang andauernde Komponente ohne jegliche Maschinenfunktion dargestellt. Während dieser Zeit ist ein leichter Druck (Tankumlaufdruck) vorhanden, dieser wird von den Maschinenherstellern mit 11 bis 12bar angegeben. Dies haben Messungen im späteren Verlauf der Arbeit bestätigt. Oft sind in einigen



Zyklen geringere Mengen des Öls als im Leerlauf der Maschine notwendig, infolgedessen wird der Energieverbrauch der Maschine kleiner als der Grundverbrauch des Motors [9].

„Die Energiekosten einer Maschine sind in hohem Maße von dem Maschinenkonzept abhängig“ [9]. Es wurde die Aufgabe gestellt, die elektrischen Antriebe mit hydraulischen Antrieben zu vergleichen. Dabei stand die elektrische Maschine im Fokus. Es stellte sich heraus, dass vollhydraulische Maschinen energietechnisch 50% mehr Energie benötigen als die elektrische Variante. Die Begründung wird in der Arbeit an der Arbeitsweise eines Dosiermotors (Vergleich Hydraulikmotor und Elektromotor) erarbeitet.

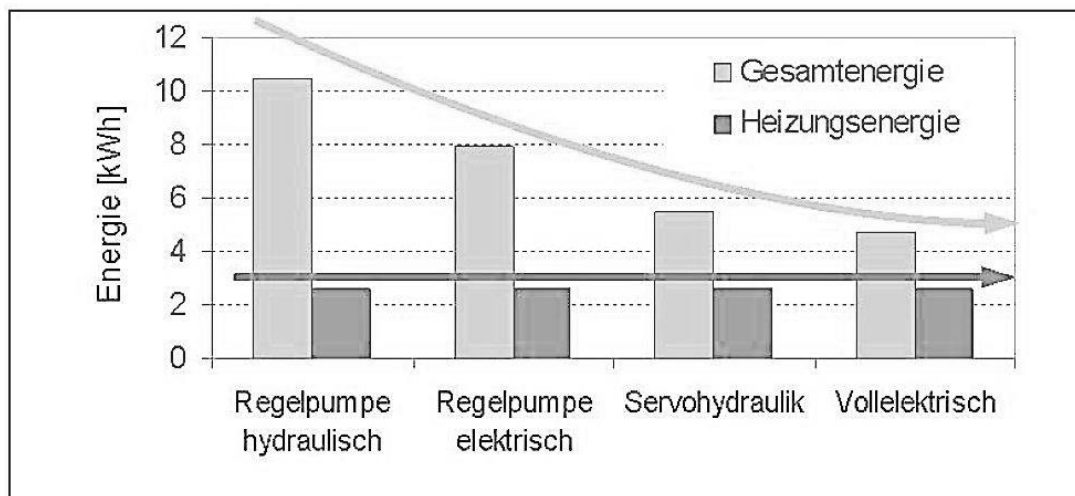


Abbildung 31: Unterschiedliche Antriebsarbeiten einer Spritzgießmaschine

Es erfolgt die Gegenüberstellung von Wirkungsgradkurven und es fällt sofort auf, dass die unterschiedlichen Wirkungsgradbereiche unterschiedliche Abhängigkeiten besitzen. Volumen und Druck sind parallel zu sehen wie Strom und Spannung. „Ob man sich bei der Verarbeitung in dem Prozessfenster bewegt, ist beispielsweise davon abhängig, ob der Dosierantrieb mit 140bar oder 70bar betrieben wird“ [9]. Aus den Kenntnissen der Mitarbeiter lässt sich ein leichter Vorzug zur hydraulischen Maschine wegen ihrer „nicht so stark eingeschränkten Arbeitsweise“ entnehmen. Dieses bestätigt Brunner in der Diplomarbeit, dass Prozessfenster durch Strom und Spannung stärker eingeschränkt seien. Jedoch sei die Energieersparnis wegen des besseren Wirkungsgrades der E-Maschinen größer [9].

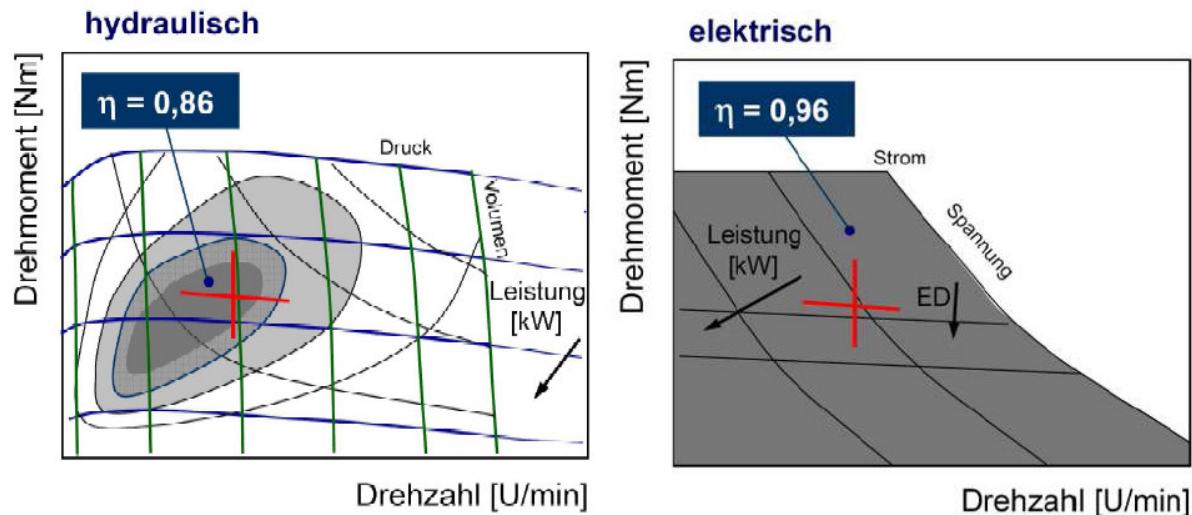


Abbildung 32: Vergleich hydraulischer Antrieb zu elektrischem Antrieb der SGM

Aus den im Unternehmen bisherigen abgeschlossenen Diplomarbeiten lassen sich folgende Informationen entnehmen: Der Energieverbrauchsunterschied zwischen den Spritzgussmaschinen lässt sich wie folgt beschreiben: Die Engelmachines Victory sind die sparsamsten von beiden. Der Grund liegt laut der Firma Engel in der neuen Antriebstechnologie ECO Drive (moderne servogeregelte Konstantpumpe). Es folgen mit dem höheren Energieniveau die Kaus Maffei Maschinen KM 80 und wieder die Arburg Maschinen 470. Die Mehrinvestition in einen vollelektrischen Antrieb bietet bei der KM keinen Vorteil. Die vollhydraulische KM-SGM beinhaltet sogar eine ältere ASM als Verstellpumpe. Weiter: Die Arburg 470H (hybrid) schneidet besser ab als die vollhydraulische 470S.

In der o.g. Arbeit wird der spezifische Energieverbrauch (Formel in den Grundlagen beschrieben) verschiedener Maschinen mit unterschiedlichsten Antriebsarten untersucht. Zwei Engel Maschinen zählen neben Arburg und Kaus Maffei zu den energieärmsten Verbrauchern. Genaue Aussagen können aber wegen statistischer Ungenauigkeiten nicht gemacht werden. Die vollelektrische KM80-380 EX ist bei minimaler Ausbringungsmenge die energiesparsamste aller Maschinen, bei maximaler Ausbringungsmenge wird ihr Verbrauch höher. „Mit Ausnahme der Arburg 470H Maschine erweisen sich die hybrid und elektrisch angetriebenen Maschinen als die energieeffizientesten“ [29]. „Es sei durch die in der Engel Victory 90 eingebaute servo-geregelte Konstantpumpe ein großer energetischer Fortschritt gelungen“ [29].

„Es zeigt sich, dass die Kurven bei den unterschiedlichen Maschineneinstellungen relativ parallel zueinander ansteigend verlaufen. Dies deutet darauf hin, dass der spezifische Energieverbrauch der

Maschinen zwar relativ stark von der Maschineneinstellung und Maschinenauslastung abhängt, die unterschiedlichen Maschinenkonzepte jedoch ähnlich auf veränderte Bedingungen reagieren“ [29].

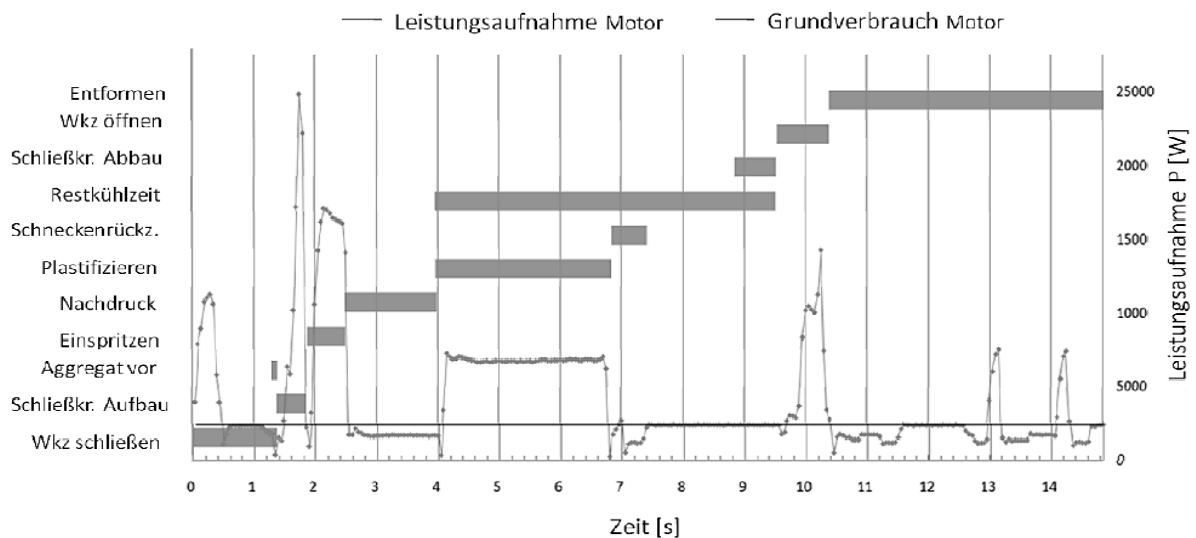


Abbildung 33: Energieanteile des Zyklus der SGM

Die Abbildung 33 [aus 29] zeigt auf aktuellen Stand gemessene Aufteilung des Produktionszyklus in seine Energieanteile. Mit dieser Messung und diesem Diagramm erklärt der Verfasser in seiner Arbeit die einzelnen Zeiten der Energieverbräuche und gewichtet diese in gewissen prozentualen Anteilen. Jedoch gibt es keine vollständigen Aussagen über die Flächengröße unter der Kurve. Beispielsweise wird „Werkzeug öffnen und Entformen“ in einer Zeitdauer dargestellt mit augenscheinlich großem Energieanteil. Verantwortlich für den eigentlichen Formgebungsprozess und größte Energieanteile sind aber der Plastifiziervorgang und der Einspritzvorgang (je nach Einspritzgeschwindigkeit) und für Spitzenleistungen der Vorgang „Werkzeug schließen“.<sup>6</sup>

Die letzte Untersuchung berücksichtigt die Maschinenkosten in einem Zeitraum von 15 Jahren. Es werden die Anschaffungskosten und Energiekosten gegenübergestellt. Nicht miteinbezogen werden die Wartungs- und Reparaturkosten, die evtl. anfallen könnten! Zu diesem Zeitpunkt wird von einem Energiepreis von 15Ct/kWh und einer zu verarbeitenden Masse von 38.420kg/a ausgegangen [29].

<sup>6</sup> In dieser Arbeit wird diese Thematik im letzten Versuch der „Beeinflussung der Spitzenleistung“ untersucht.

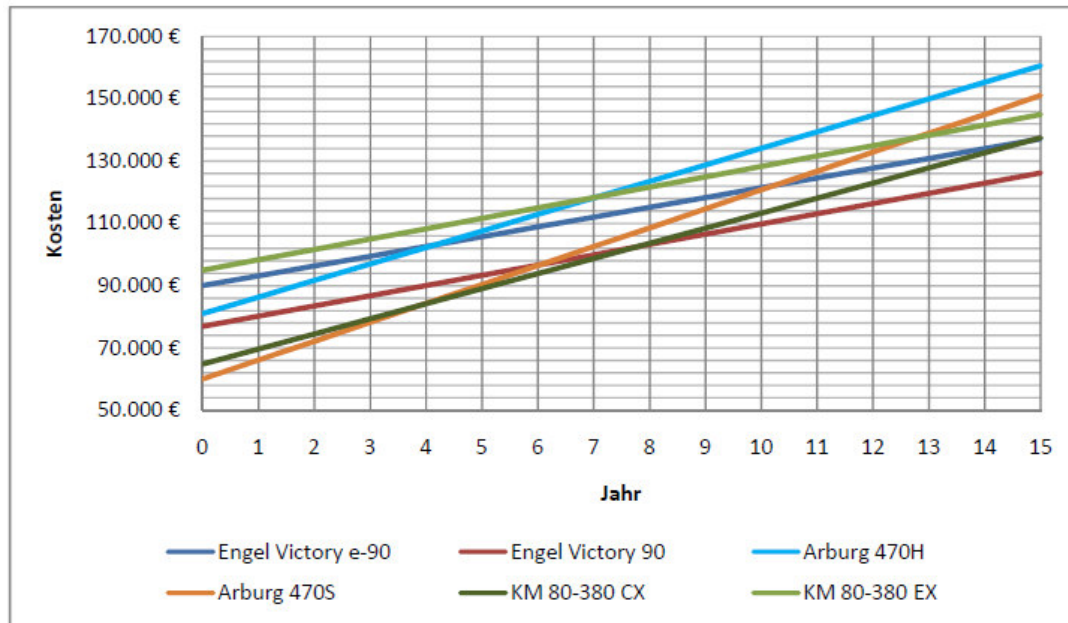


Abbildung 34: Maschinenkosten über 15 Jahre

Es stellt sich bei der Untersuchung heraus, dass sich für die Engel Victory 90 Maschine bereits nach acht Jahren die Investitionskosten, welche ggü. der KM80-380 CX und Arburg 470S höher sind, auszahlen. Bei der Maschine KM 80-380 CX wird von einer sehr geringen Investitionskosten von ca. 64.000€ ausgegangen. Jedoch rentiert sich diese gegenüber der Engel Victory 90 erst nach 15 Jahren. Ebenso ist mit guten Ergebnissen bei der Engel eVictory 90 zu rechnen. Es zeigt, die Anschaffungskosten sind zwar geringer (Beispiel Arburg 470S), dieser Vorteil schwindet aber anschließend durch den höheren Energieverbrauch der Maschine über die Jahre. Die Hybridmaschine Arburg 470H liegt aufgrund der hohen Investitionskosten an oberster Stelle und bietet laut Aussage der Bachelorarbeit leider nur einen geringen energetischen Vorteil [29].

„Die Kostenentwicklungen der Maschinen auf Basis des Energieverbrauches werden in entscheidendem Maße durch den spezifischen Energieverbrauch beeinflusst“ [29]. Daher wird in der Bachelorarbeit bei der Energiemessung auf mittlere Produktionsbedingungen hohen Wert gelegt.

#### 4.4 Herstellung mit hohem Qualitätsstandard durch Qualitätsmodell

In der realen Produktion muss der Prozess oft wegen mangelnder Qualität nachgeregelt werden. Die Nachregelung erfolgt dann wegen fehlender oder schlechter Eigenschaft eines Produkts. Der von der Maschine geleistete Istwert ist demnach mit einem von der Qualitätssicherung vorgegebenen Sollwert zu vergleichen. Sind die dann entstehenden Abweichungen zu groß, bedarf es einer Nachregelung. Diese dann entstehenden Regelschritte und die vorher aufgenommenen Abweichungen werden erfasst und für ein Modell als Info abgelegt, welches alle Zusammenhänge von Produkt und Parameter enthält. Die Unternehmen der Kunststoffindustrie versuchen oft in ihren

Produktionsprozessen Material einzusparen. Wichtig ist aber, dass nach der Produktion eine Qualitätsprüfung stattfindet und das Produkt den Anforderungen des Kunden gerecht wird. Somit ist eine bloße Regelung nach großen Produktivitätskennzahlen oder minimalen Materialeinsatz ausgeschlossen [24, 32]. Beispielsweise ist neben der Abmessungen genauso das Produktgewicht für den Kunden entscheidend, sodass ein speziell ausgewähltes Bauteilgewicht durch Nachstellung des Dosiervolumens in den optimalen evtl. eng tolerierten Gewichtsbereich zurückgeregelt werden kann [49]. Je nach Antriebstechnologie ist die Abfolge der einzelnen Prozesse (vor allem bei hydraulischen Maschinen) nicht immer die gleiche. Es finden minimale Änderungen von Schuss zu Schuss statt. Dieses wird vor dem Entstehen dieser Dissertation oftmals in Versuchsreihen deutlich. So lässt sich ein Prozess, der genau aufgenommen wird, nicht 100% deckungsgleich auf den darauf folgenden Prozess übertragen. Es existieren verschiedene Lösungsansätze zur Qualitätsregelung. Im Gegensatz zu physikalischen Modellen werden hierbei zunächst keine Informationen über physikalische Zusammenhänge benötigt. Es fließt der notwendige Teil an Prozesswissen in den Prozess ein. Dieses System ähnelt dem Gedanken des Systems der schlanken kontinuierlichen Verbesserung. Ein Prozess, der Fehler aufwirft, wird dokumentiert und aus diesem Wissen werden Verbesserungen zur späteren Zielerreichung erarbeitet. Diese werden in einem Standard formuliert.

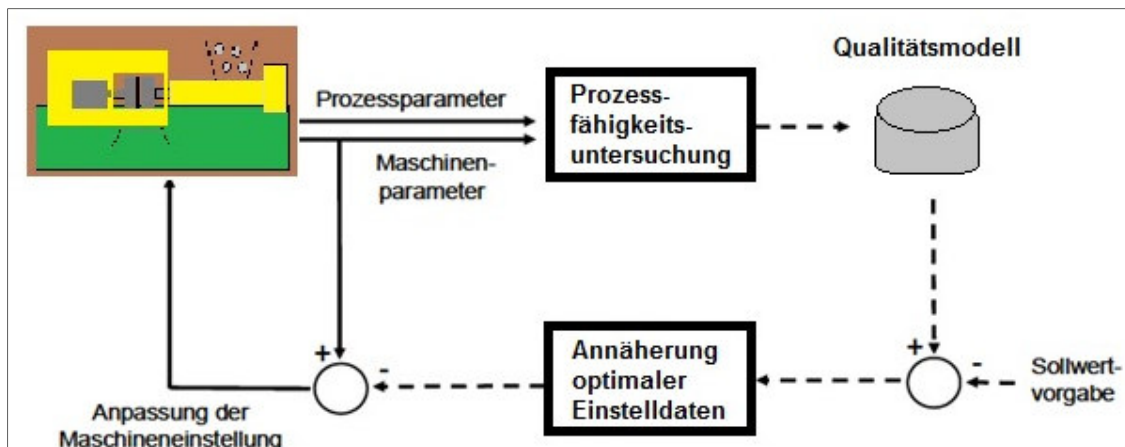


Abbildung 35: Qualitätsprognose über Prozessführung

Es wird nach neuen Methoden gesucht, den Ablauf eines solchen Prozesses [Abb. aus 49] allgemeingültig abzubilden, alternativ zur physikalischen Aufnahme der Parameter. Die aus dem Prozess entstehenden Wechselwirkungen und Prozesszusammenhänge werden in eine Art Modell eingegeben. Diese stellen den Zusammenhang zwischen Prozess und Qualitätsgrößen anhand von gemessenen Datensätzen aus dem Herstellungsprozess dar. Diese Modelle sind leider sehr theoretisch. Sie entstehen oft durch die Berechnung von theoretischen Zahlen und nicht durch reale Erfahrungswerte.

Die heute auf dem Markt erhältlichen Spritzgießmaschinen verfügen über direkte Antriebstechniken ohne hydraulische Komponenten. Es kommt auf eine Wiederholgenauigkeit an, welche nun die deckungsgleiche Abbildung aufeinanderfolgender Produktionsprozesse ermöglicht. Das Thema Prozessfähigkeit wird im nächsten Kapitel noch ausführlich besprochen. Gute cp-Werte (hier: Prozessfähigkeitswerte) lassen sich nach heutigem Stand durch vollelektrische und elektromechanische Spritzgießmaschinen erreichen [49, 61]. Einspritzphase und Nachdruckphase werden extra geregelt und sind vollautomatisch auf das Erreichen eines guten theoretischen Druckwertes (Werkzeuginnendruck) oder Geschwindigkeitswertes (Zykluszeit) programmiert. Vollhydraulische, ältere Maschinen erlauben jedoch schon eher einen Eingriff in den Prozess, während die neuen vollautomatisierten Maschinen sich an theoretisch hinterlegte Modelle halten. So lassen sich auch nur bei älteren Maschinen die Wegwerte von Weggebern in eine SPS-Steuerung eingeben sowie Einschalt- und Umschaltunkte extern analysieren. Es wird alles von der maschineninternen Steuerung übernommen. Bei den in dieser Arbeit durchzuführenden Versuchen werden Qualitätsparameter durch das vorbestimmte Produkt als Erfahrung in die Versuche miteingebracht. Es wird sich hier nur auf eine Antriebsweise, der vollhydraulischen Maschine, konzentriert. Andere Maschinentypen sind demnach mit ähnlicher Methodik zu untersuchen und weisen sicherlich andere Input- und Outputgrößen einer Energiebilanz auf. Beispielsweise sind hier Hybridmaschinen und elektromechanische Spritzgießmaschinen zu nennen. Die neusten Maschinen sind sicherlich produktionstechnisch auf besserem Stand der Technik. So werden Abweichungen in der Qualität der plastifizierten Schmelze, im Betriebsverhalten der Schnecke oder des Schneckenkolbens über die in der Maschine vorhandene Sensorik erkannt und zu einer Anpassung des Prozesses während eines Zyklus verwendet. Jedoch werden Probleme erst im zweiten Schritt deutlich: Zum zügigen Erreichen des eingestellten Nachdruckniveaus wird die Schnecke zu Beginn der Nachdruckphase abrupt zurückgezogen. Hier sind elektrohydraulische Maschinen in ihrer Belastungen nicht so stark an der Grenze wie die elektromechanischen. Die Hydrauliksysteme sorgen für eine Art Pufferung zwischen Antriebmotor und Antriebs-Gegenstück. Nicht immer sorgt der neuste Stand der Technik für eine längere Lebensdauer [25, 49].

## 4.5 Maschinenfähigkeitsuntersuchung

Die Fähigkeit der fehlerfreien Produktion einer Maschine soll nachweisen werden können. Es wird die Maschinenfähigkeit als neue Begrifflichkeit eingeführt. Ziel ist es einen Herstellungsprozess zu betreiben, auf den prozessbestimmende Einflussparameter keine Auswirkungen auf das Produkt haben. Er werden Idealbedingungen formuliert bei denen [22] in einer großen Stichprobe von mindestens 20 Stück (besser 50 Stück oder mehr) aus der laufenden Fertigung die auf der Maschine

produzierten Teile nach Abmessungen oder Gewicht untersucht werden. Erwartet wird nach statistischen Berechnungen bei einer guten Kennzahl eine normalverteilte Messreihe. Die Auswertung kann graphisch unterstützt werden, indem die Messwerte in ein Wahrscheinlichkeitsnetz eingetragen werden.

Der erste statistische Kennwert ist der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$ , welcher die Lage der Verteilung beschreibt. Er wird mit der Formel 4.1 beschrieben.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (4.1)$$

$\bar{x} \rightarrow$      Arithmetischer Mittelwert

$n \rightarrow$      Anzahl der Messwerte

Die Spannweite  $R$  [4] wird durch die Formel 4.2 berechnet und beschreibt die Differenz zwischen dem größten und kleinsten aufgenommenen Messwert. Sie gibt die Endpunkte der Verteilungskurve im späteren Verlauf an.

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (4.2)$$

$x_{max} \rightarrow$      Einzelmesswert maximal

$x_{min} \rightarrow$      Einzelmesswerte minimal

Die Streuung der Werte innerhalb des Prozesses wird mit der Standardabweichung  $s$  [4] beschrieben. Mit folgender Formel 4.3 wird sie berechnet:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (4.3)$$

$s \rightarrow$      Standardabweichung

$n \rightarrow$      Anzahl der Messwerte

$x_i \rightarrow$      Einzelmesswerte

Die Maschinenfähigkeitskennwerte  $c_m$  und Prozessfähigkeitskennwerte  $c_p$  können mit einer Stichprobe der Normalverteilung berechnet werden.

Die Maschinenfähigkeit  $c_m$  [4] stellt das Verhältnis der Toleranz zu der Prozessstreuung dar und wird mit nachfolgender Formel 4.4 beschrieben.

$$cm = \frac{T}{6s} \quad (4.4)$$

$T \rightarrow$  Toleranzen

Die Prozessfähigkeit  $cp$  wird auf gleiche Weise berechnet und bezieht sich auf einen längeren Zeitraum der Streuung. In festgelegten Intervallen werden im Gegensatz zur MFU die Stichproben gezogen. Es handelt sich um eine Langzeituntersuchung.

Toleranzen [4] sind zugelassene Abweichungen von den Sollvorgaben und werden in der Konzeptphase festgelegt. Definiert sind die Toleranzen in der Formel 4.5.

$$T = OGW - UGW \quad (4.5)$$

$OGW \rightarrow$  Oberer Grenzwert

$UGW \rightarrow$  Unterer Grenzwert

Das Ziel der MFU (Maschinenfähigkeitsuntersuchung) bzw. PFU (Prozessfähigkeitsuntersuchung) ist es Erkenntnisse über die Fähigkeit und Beherrschbarkeit von Prozessen zu gewinnen [22]. Abbildung 36 [aus 72] zeigt die Verteilung im 6-Sigma Bereich. Die Kennwerte  $cm$  (Maschinenfähigkeit) und  $cp$  (Prozessfähigkeit) geben grundsätzlich eine Aussage über die Fähigkeit der Maschinen. In der Abbildung 37 [aus 22] sind Forderungen an das Maschinen- und Prozessverhalten sowie die Prozessbewertung und die notwendigen Maßnahmen dargestellt.

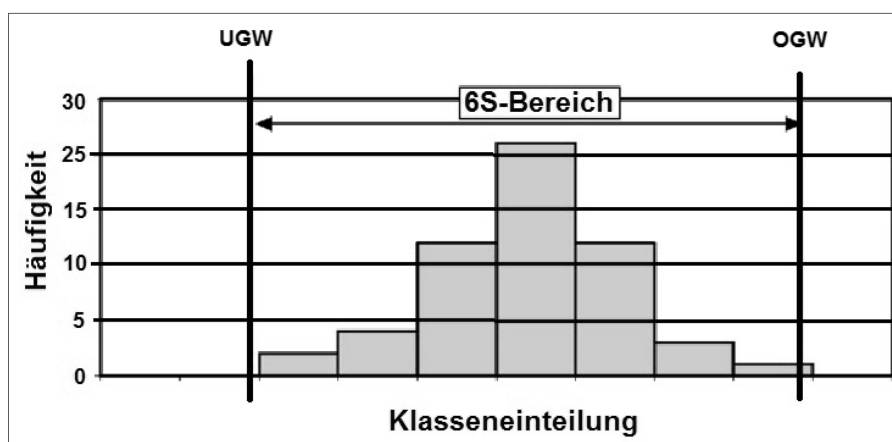


Abbildung 36: Messwerte im Histogramm



Die Berechnung der Maschinenfähigkeit wird im Ausblick dieser Dissertation an einem Beispiel der auf der Arburg produzierten Teile (Beispiel Kappe) durchgeführt. Diese wird nach vier verschiedenen Abmessungen untersucht und es werden vier cm-Werte errechnet. Weitere Informationen empfiehlt sind aus der primären Fachliteratur des Qualitätsmanagements zu entnehmen. Diese führt ein detailliertes Beispiel einer SPC (statistischen Prozessreglung) und zeigt den Aufbau einer Qualitätsregelkarte. Die Formeln und Berechnungen der cm-Werte werden auch hier vorgestellt [22].

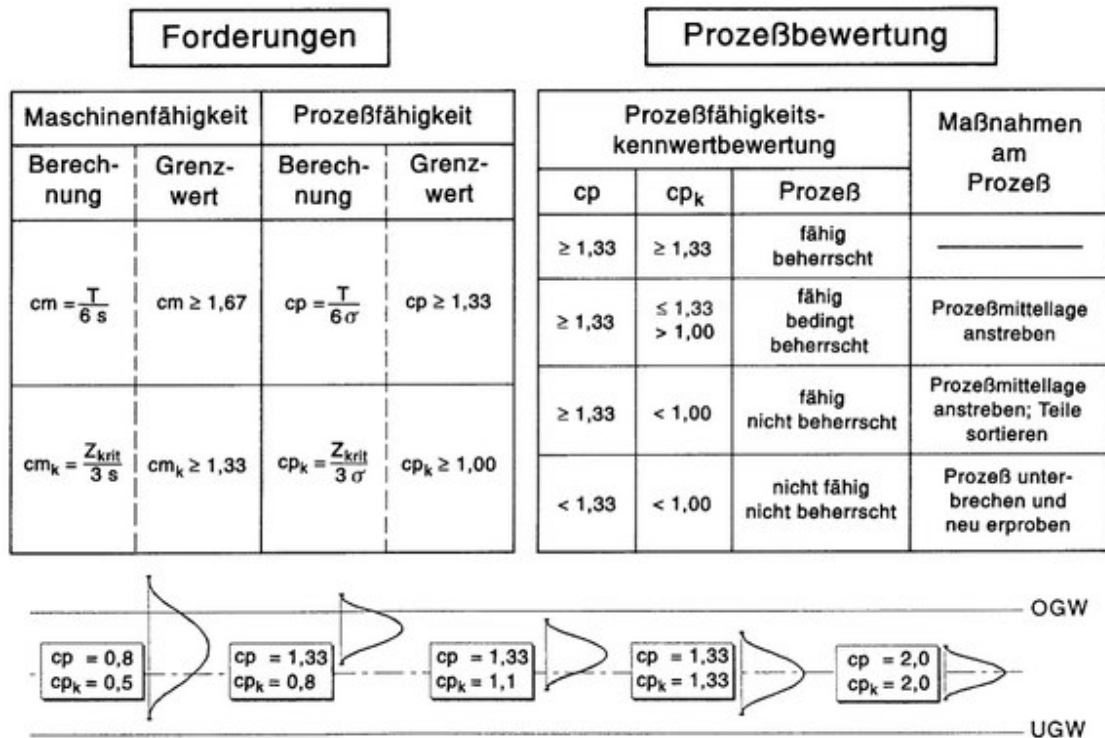


Abbildung 37: Bewertung der MFU, Kriterien und Forderungen

## 5. Die Prüfung von mathematischen Berechnungsmethoden zur Auswertung von Messwerten

### 5.1 Berechnung der Funktionswerte anhand von Stützstellen

#### Interpolationsmethoden

Wenn eine gewisse Anzahl von Daten vorhanden ist, ist es erforderlich diese mit einer mathematischen Funktion zu verbinden. Oft wird nach einer Beziehung der Punkte zueinander gesucht. Zwischen den Datenpunkten treten Lücken auf, bei denen die Funktionswerte ungewiss sind. Jedoch werden diese oft für eine Auswertung in der Praxis benötigt, da sich nicht alle Ursprungswerte (x-Werte) simulieren oder praktisch erproben lassen (Bsp. Hydraulikdruck). Eine Maschine lässt sich nicht zu jeder Zeit aufnehmen, ab einer gewissen Auflösungshöhe (Abtastrate) versagt das Messsystem. Aus der numerischen Mathematik lassen sich viele Methoden aufzeigen, dieses Problem zu lösen. Es werden einige Methoden [86] im kommenden Abschnitt vorgestellt: Hier sollen die Interpolation einer linearen Beziehung sowie die Interpolation auf der Grundlage eines kubischen Splines behandelt werden. Die folgende Abbildung 38 [aus 86] zeigt: 1) gegebene Datenpunkte 2) Interpolation lineare Beziehung und 3) Spline Interpolation (kubisch).

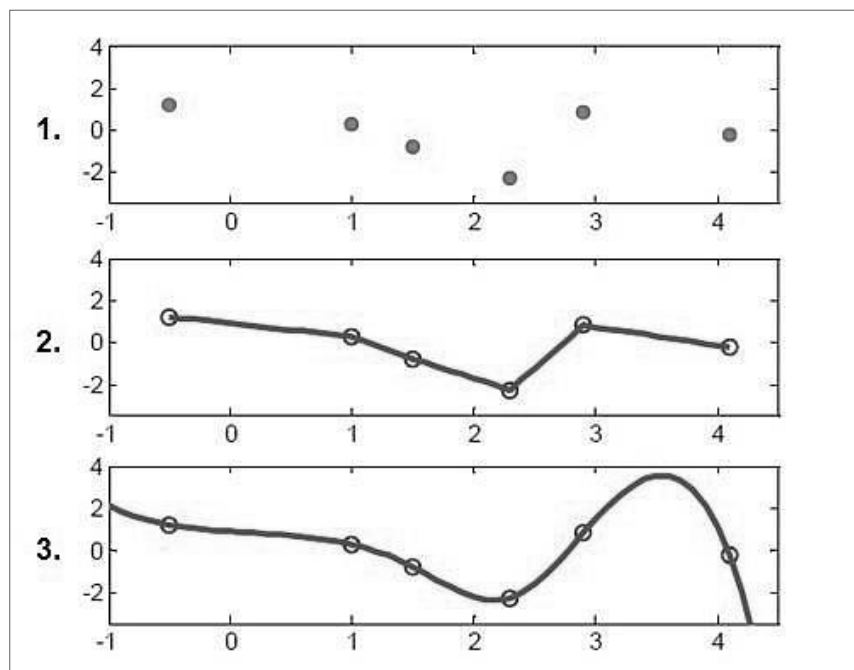


Abbildung 38: Datenpunkte und Interpolation

## 5.2 Auswahl der Methodik für den weiteren Verlauf der Arbeit

Untersuchung zweier mathematischer Methoden (Newton Interpol und Spline) anhand der Ausprägungen

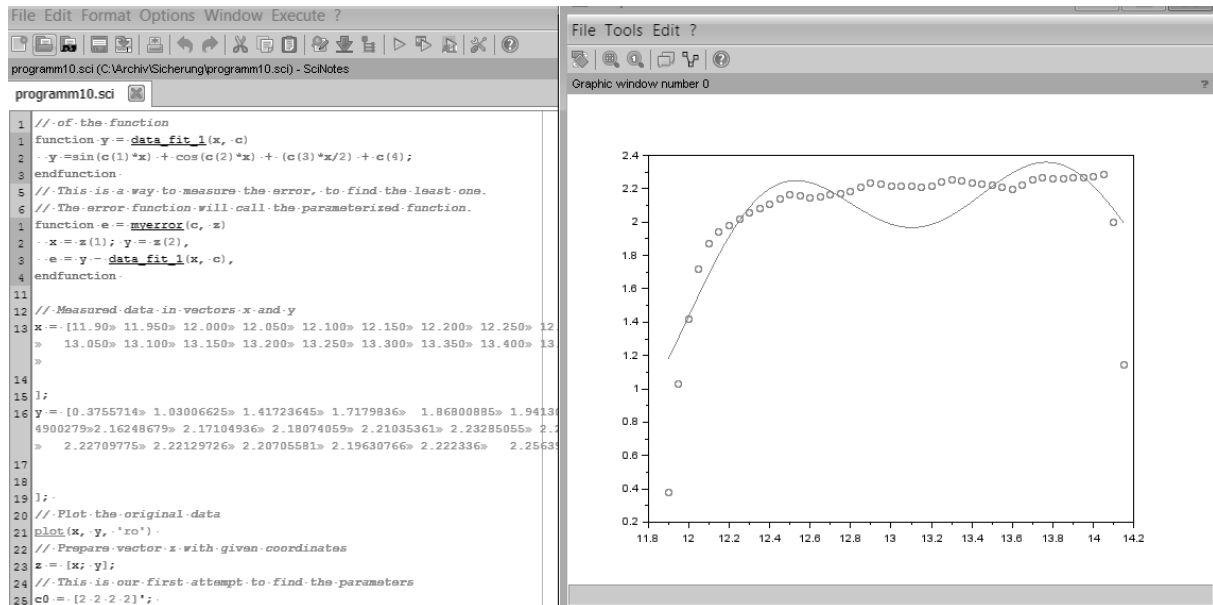
Kriterium	Ausprägung der Lösung und Vergleich	
Mathematisches Rechenschema	Newton Interpolation	Splinefunktion
<i>Aufwand der Berechnung</i>	niedrig	Höher, Matrix
<i>Komplexität der Lösung</i>	Lösung eine Gleichung	Lösung eine Gleichung
<i>Umsetzbarkeit der Lösung</i>	leichte Umsetzung	schwerfällige Umsetzung
<i>Implementierbarkeit in vorh. Steuerung</i>	einfach	schwieriger
<i>Ausführbarkeit durch Mitarbeiter</i>	einfach	Ausführbarkeit zufriedenstellend
<i>Detailgenauigkeit, Qualität</i>	niedrig, Funktion nicht passend wegen Überspringen	Hoch durch Matrix
<i>Quantität der Eingabe</i>	gut	gut
<i>Speicherplatz</i>	niedrig	größer durch Matrix
<i>Installationsumfang, Zeit der Implementierung</i>	niedrig	Hoch, Hilfe von Fachkräften notwendig
<i>Rechnerkapazität</i>	Niedrig durch 1-dimensopnale Daten	Hoch durch 3-dimensionale Matrixdaten

Tabelle 4: Ausprägungen und Eigenschaften

Die Datenqualität ist bei der Lösung 1 eher zufriedenstellend als gut. Dieser Faktor geht aber durch die vielen kleinen Gegebenheiten verloren. Es muss in dieser Arbeit festgestellt werden, ob die Datenqualität des ersten Verfahrens ausreicht, um korrekte und möglichst genaue Ergebnisse erzielen zu können. Das Verfahren 2 ist schwerer umsetzbar und könnte u.U. keine sinnvollen Ergebnisse aufgrund der Datenvielfalt liefern. Von dem Autor Herrn Schwandt existiert eine Programmdarstellung in C++, welche es möglich machen würde eine Spline-Interpolation zu implementieren. In dieser Arbeit wird die Möglichkeit der Polynominterpolation auf Grund der Zeitintensität ausgewählt. Diese soll auch nur zur Verifizierung einer anderen im Arbeitskreis möglichen automatisierten Methode dienen.

### 5.3 Praktische Umsetzung des ausgewählten mathematischen Verfahrens

## Untersuchung der Polynominterpolation mit mathematischer Software SCILAB

Abbildung 39: Interpolation mit SCILAB Software<sup>7</sup>

Vorgehen: Zur Polynominterpolation werden Daten ähnlich der Plastifizierungskurve im Spritzgussprozess eingegeben. Es wird in der Software Scilab ein Programm mit zwei Rechnungen entworfen.

1. Polynominterpolation mit Interpolationsfehlerangabe
2. Numerische Integration

Schritt 1 beinhaltet die aus der Maschine zur Verfügung stehenden Daten über Hydraulikdruck und Wegpunkte während des Einspritzens. Ziel ist es die Größe der Einspritzarbeit zu ermitteln. Aus diesen wird über die Angabe einer Funktion (welche empirisch ermittelt wird) eine Polynominterpolation durchgeführt. Die Koeffizienten werden durch diese Software ermittelt.<sup>8</sup>

Schritt 2 beinhaltet die numerische Integration unter der Interpolationsfunktion nach der Trapezregel. Es wird die Größe „Arbeit“ = Fläche unter der Druckkurve über dem Weg (Einspritzarbeit) oder Leistung über der Zeit (Plastifizierarbeit) berechnet.

<sup>7</sup> Abbildung aus eigener Darstellung, durch Programmiertests mit SCILAB-Software

<sup>8</sup> Die Literatur verweist auch noch auf andere Software. Die Software Scilab soll nur hier als Beispiel dienen.

Die Funktion  $y$  bezeichnet die Data Fit Funktion (1). Die Funktion besteht aus sinus- und cosinus-Anteilen mit den jeweiligen Koeffizienten  $c_1$  bis  $c_4$  (2). Um den Interpolationsfehler zu beschreiben, wird die Differenz der  $y$ -Werte und der Data Fit Funktion gebildet. Dieses ergibt den error  $e$ . Die gemessenen Daten werden in vektorieller Schreibweise eingetragen. Die  $x$ -Daten in (13) und die  $y$ -Daten in (16).

```

34
1 function [I1]= Trap_composite (f, a, b, n)
2     ... h=(b-a)/n
3     ... x=linspace (a, b, n+1)
4     I1=(h/2) * (2*sum(f(x))-f(x(1))-f(x(n+1)))
5 endfunction
40
41 //deff ('[y]=f(x)', 'y=cos(copt(1,:) *x) + (copt(2,:) *x.^3) + (copt(3,:) *x.^2) + (copt(4,:) *x) + copt(5,:) ')
42 //Warnung: definiere Funktion neu: f ..... Verwende funcprot(0), um diese Nachricht zu vermeiden
43
44 //Trap_composite(f, 11.9, 14.15, 1000)
45 //ans =
46
47 ... // 18.390395 ...

```

Abbildung 40: Programmschritt 2, numerische Integration<sup>9</sup>

Die Funktion „I1“ führt die Numerische Integration durch (1). Die Schrittweite  $h$  (2) und die Integrationsgrenzen  $a$  bis  $b$  (3) werden festgelegt. Die Numerische Integration wird durch die Formel (4) beschrieben. Die Berechnung kann wie unten im Beispiel erfolgen (41 und 44). Dafür wird zuerst die Funktion mit den aus Schritt 1 ermittelten Koeffizienten definiert und anschließend die numerische Integration durchgeführt. Es erscheint das in (47) angegebene Ergebnis. Das Ergebnis ist mit den Einheiten, die sich aus der Integration ergeben, zu versehen.

## 5.4 Zusammenfassung über die Prüfungsmethodik

Für die Berechnung der Einspritz- und Plastifizierarbeit kommt nach einer Gegenüberstellung der Spline- und Polynominterpolation ausschließlich das letzte Verfahren mit anschließender numerischer Integration in Frage. Die Methodik kann wegen der vielen Messpunkte nicht durch manuelle Verfahren mit Nebenrechnung durchgeführt werden. Es muss auf geeignete Interpolationssoftware zurückgegriffen werden. Hierfür ist die im Internet erhältliche Freeware Software „Scilab“ am geeignetsten. Die Auswertemethodik eignet sich wiederum dazu, die später automatisierten Berechnungsmethoden für die Raumbilanzen (mittlere Leistung pro Zyklus) sowie die Prozessbilanzen „Einspritzen“ und „Plastifizieren“ (Arbeitsgrößen) zu verifizieren.

<sup>9</sup> Abbildung aus eigener Darstellung, durch Programmiertests mit SCILAB-Software

## 6. Versuchsreihen -Vorbereitung und -Durchführung

### 6.1 Der Versuchsaufbau

Ziel der ersten Versuchsreihe soll die Ermittlung des Gesamtenergieverbrauches sein. Hierzu müssen die Parameter und der Maschinenzweck gegenüber gestellt werden. Die Spritzgießmaschine beinhaltet viele Komponenten, die ihrer Priorität nach aufgenommen werden müssen. Nicht jede Komponente trägt gleich viel zum Energieverbrauch zu jeder Zeit bei. Der Gesamtenergieverbrauch schwankt kontinuierlich über den gesamten Spritzgießprozess. Davon abgeleitet müssen die Heizenergieverluste (eingestellte Zylindertemperaturen), Grundverbrauch der Maschine und der Verbrauch durch die Steuerung ermittelt werden. Dieser ist separat zu ermitteln, da die Steuerung ein Hilfsgerät und nicht den eigentlichen tatsächlichen Verbraucher der Spritzgießmaschine darstellt.

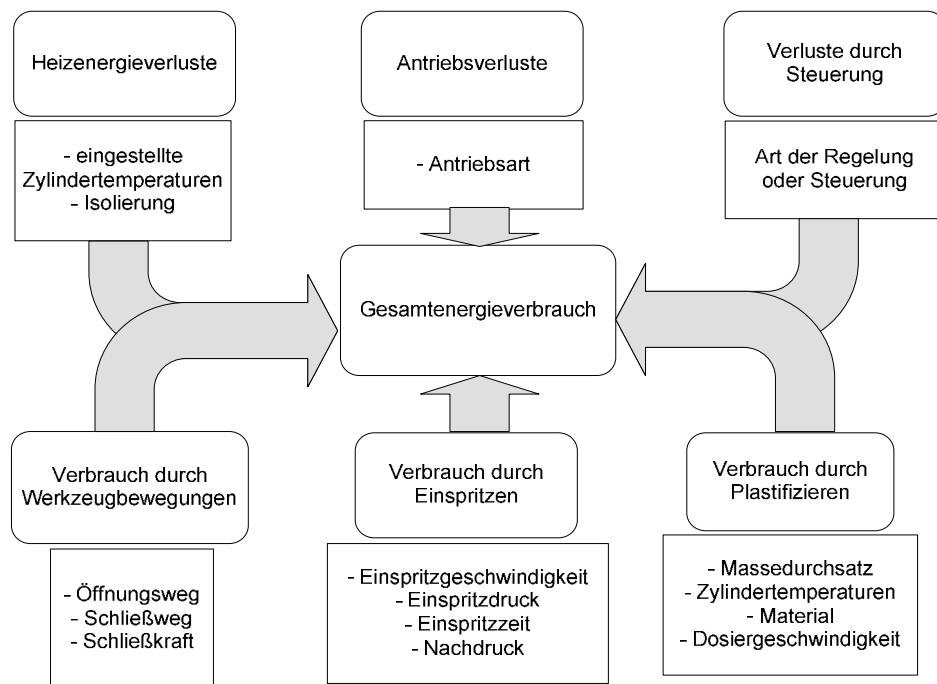


Abbildung 41: Einflüsse auf den Gesamtenergieverbrauch der Spritzgießmaschine

Zur Ermittlung der Energieparameter im Einspritzprozess ist der Verbrauch durch die Werkzeugbewegung (Einspritzdruck, Nachdruck, Schließkraft) zu ermitteln. Der Plastifiziervorgang stellt die zweite wichtige Komponente des Spritzgussprozesses dar. Aufzunehmen sind hier der Massedurchsatz, Dosiergeschwindigkeit und der Staudruck. Wie diese Parameter in der dafür vorgesehenen Zeit aufgenommen werden, wird in der folgenden Abbildung 43 [aus 49] auf Seite 75 deutlich, die den schematischen Vernetzungsaufbau des Messsystems der Maschine beschreibt.

## 6.2 Einleitung zur Entwicklung und Auswahl eines Messsystems



Abbildung 42: Einrichtung des Labors von der Firma Pöppelmann für die Dissertation

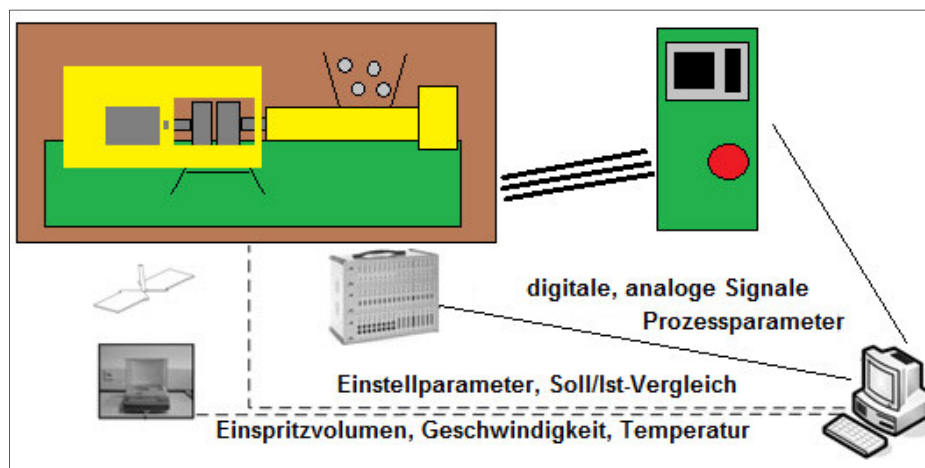


Abbildung 43: Schematischer Messauswertungsaufbau

Die Signale werden durch eine Analog/Digitalwandlung mit z.B. 12 Bit und 1000 Hz für die Berechnung von Kennzahlen bereitgestellt [49]. Die Berechnung der Prozessparameter erfolgt mittels eines PCs und der Datenverarbeitungs-Software DasyLab oder eines Beckhoff Messsystems. Für jedes produzierte Formteil werden Einzelkennzahlen (Tabellen 79, S.224) gemessen und in einer Datenbank abgelegt. Darüber hinaus werden für jeden Zyklus die zeitlichen Verläufe von den Prozessparametern zur Nachverfolgung der Eingabe auf dem Bildschirm angezeigt und während des

Versuches ebenfalls in der Datenbank (Parameter-Liste, Tabelle 24, S.125) abgelegt. Eine Auflistung aller aufgezeichneten Maschinensignale sowie der daraus berechneten Kennzahlen wurde für die Doktorprüfung auf der Anhang-CD unter „SPS\_Programm\_PLC\_Control“ abgegeben.<sup>10</sup>

Ein zweiter PC im Versuchsaufbau ist mit der Spritzgießmaschine verbunden. Über eine Drucker-Schnittstelle werden die maschinenintern berechneten Prozessdaten sowie die aktuellen Soll- und Istwerte der Maschine in die bereits genannte Datenbank übertragen.

Die an der Maschine als Analog- und Digitalsignale gemessenen Signale der Prozess- und Überwachungsparameter werden mit der kommerziell verfügbaren Datenerfassungssoftware DasyLab (Data Acquisition Laboratory) oder einer Beckhoff-Steuerung mit einer SCOPE Software weiter bearbeitet.

## 6.3 Vergleich von zwei Datenauswertungssystemen

### 6.3.1 Das DASYLab Auswertesystem

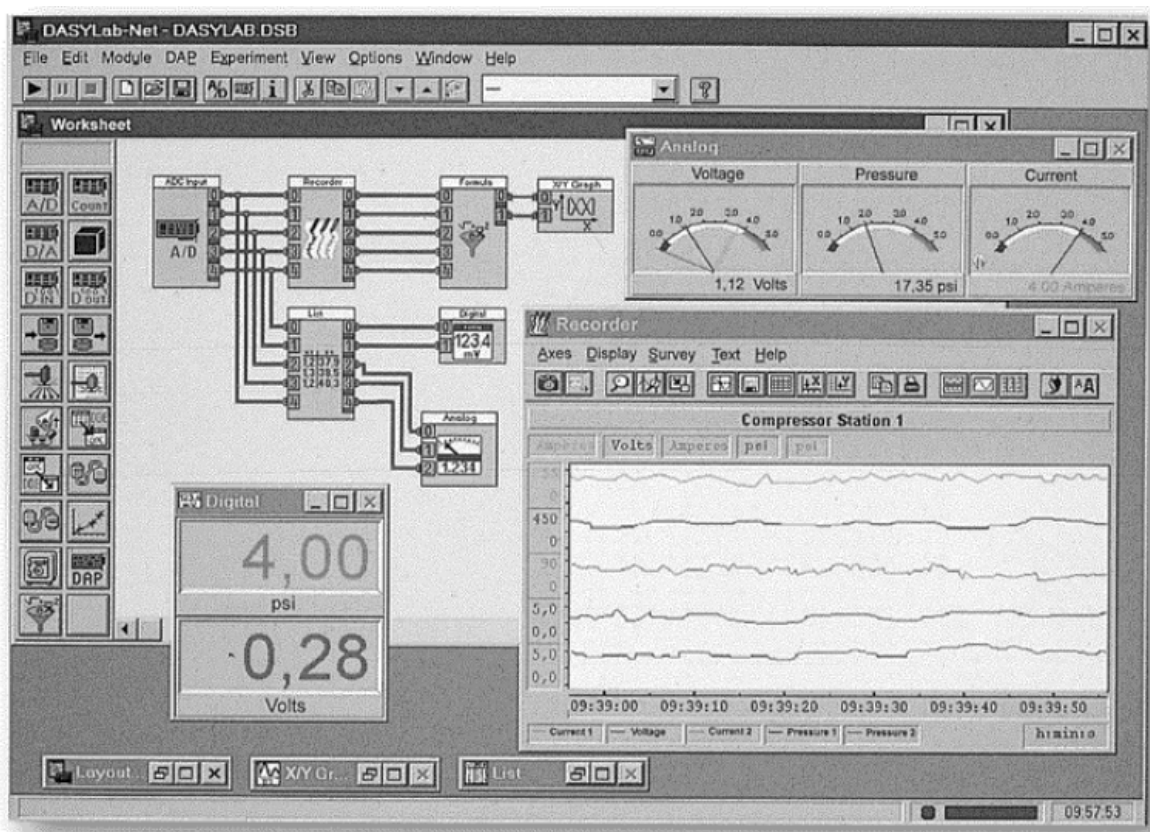


Abbildung 44: DasyLab Benutzeroberfläche

<sup>10</sup> Info aus Handbuch Spritzgießen, Änderungen des Messaufbaus vorbehalten



Über eine frei zusammenstellbare Oberfläche [78] mit Funktionsblöcken (Module), die entsprechend der Aufgabe parametrisiert und zu Schaltbildern verbunden werden, werden die Eingangsdaten verarbeitet und die Kennzahlen für jeden Zyklus berechnet. Weiterhin liegen sämtliche Kennzahlen nach jedem Zyklus graphisch aufbereitet vor, um Änderungen im Prozess direkt erkennen zu können. Alle Kennzahlen werden zyklusbezogen in einer zentralen Datenbank gespeichert.

Das Signal kommt in analoger Größe aus der Mess-Sensorik (Temperaturfühler und Druckaufnehmer) und wird anschließend durch die Messverstärker in digitale Größen verarbeitet. Die Schaltung [90] wird in der folgenden Skizze beschrieben.

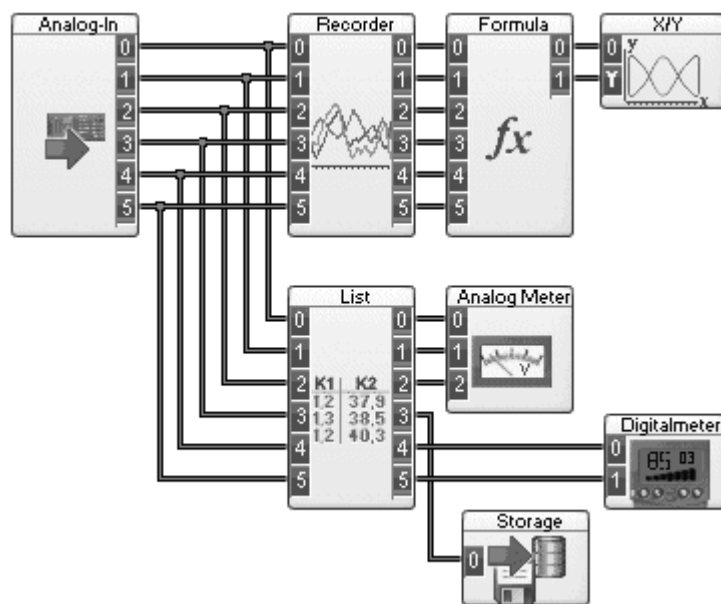


Abbildung 45: DasyLab Funktionsbausteine

Eine mögliche Verbesserung des Aufbaues wäre: Das als Qualitätsparameter verwendete Bauteilgewicht ebenfalls über eine Schnittstelle zur Waage zu übertragen und abzuspeichern. Auf einem anderen PC könnte während einer Versuchsreihe eine Qualitätssoftware, wie z.B. WinQS laufen, die zur Qualitätsprognose eingesetzt wird.

Neben den Prozessparametern, die für die Berechnung der Kennzahlen benötigt werden, werden bei den Versuchsreihen verschiedene zusätzliche Parameter gemessen. Einige Parameter dienen hauptsächlich der Überwachung der Spritzgießmaschine sowie des Werkzeuges. So werden z.B. mehrere Temperaturen an der Maschine (Zylinderheizzone, Zylindereinzugszone, Rohmaterial<sup>11</sup> und Werkzeug) zur Überwachung der Prozesskonstanz als Mittelwert über einen Zyklus gemessen und ebenfalls zur Versuchsdokumentation gespeichert.

<sup>11</sup> Info der Materialeigenschaften für Wärmeübertragungseigenschaften wichtig, Kapitel 2.4

## 6.3.2 Das Beckhoff Auswertesystem

### Beckhoff Klemmen (Hardware)

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen möglichen Aufbau einer Beckhoff Steuerung, wie sie in der Produktion, aber auch in der Klimaversorgung und andere Bereichen eingesetzt wird. Sie besteht aus den sog. Eingangs- und Ausgangsklemmen sowie der CPU und dem Netzteil (beides nicht in Abbildung).

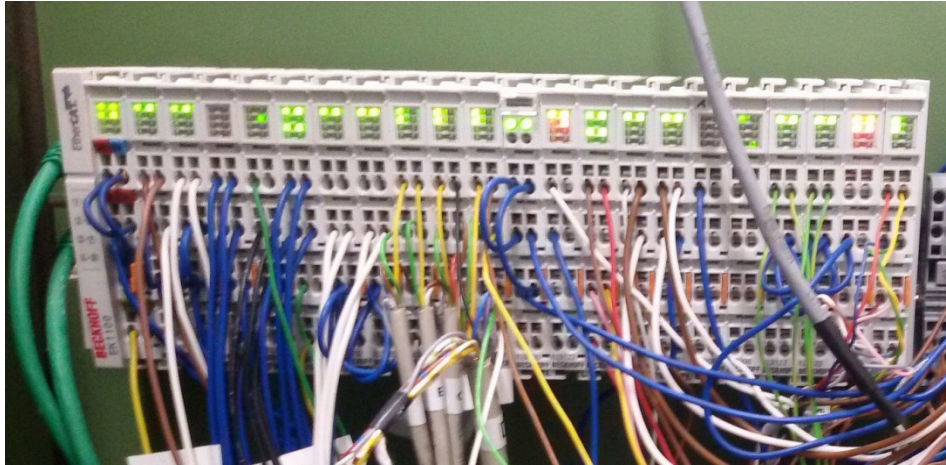


Abbildung 46: Beckhoff Messsystem

### TWIN Cat Systemmanager

Der Twin Cat Systemmanager besteht aus dem Übersichtsreiter mit der Systemkonfiguration und den Einstelldaten der Eingangs- und Ausgangsklemmen. Außerdem zeigt er die für den Betrieb erforderlichen Verknüpfungen der Globalen Variablen an.

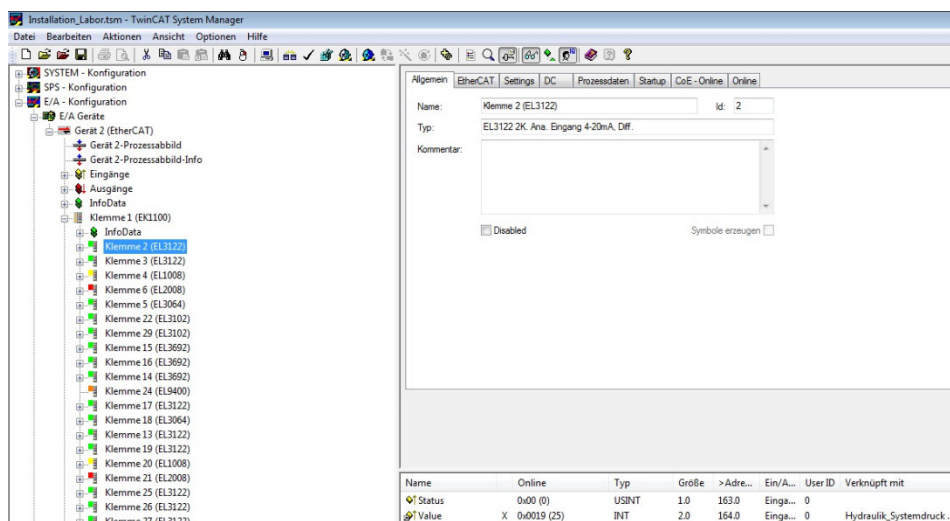


Abbildung 47: Beckhoff Systemmanager

Die obere Abbildung zeigt den Systemmanager mit den o.g. drei Fenstern. Die Klemme EL3122 ist eine analoge Eingangsklemme für einen Messstrom 4bis20mA. Diese kann im mittleren Fenster konfiguriert werden. Im linken Fenster werden die Variablen verknüpft. Das gesamte Messsystem kann mit seinen Klemmen beliebig erweitert werden. Es sind somit viele Erweiterungsmöglichkeiten vorhanden, welche nur von der Strombelastung und der Variablenanzahl begrenzt werden.

### TwinCAT PLC Control

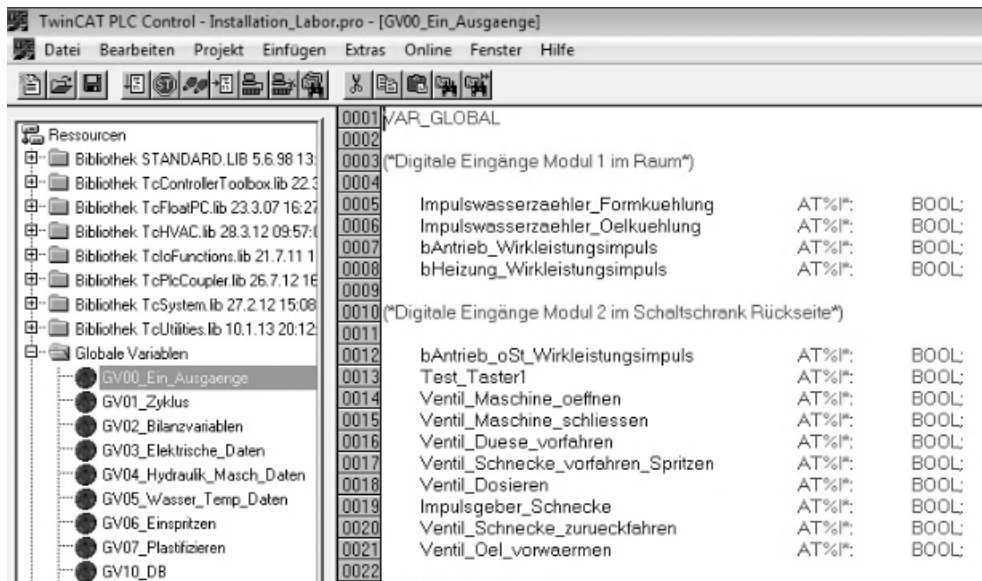


Abbildung 48: Beckhoff PLC Control

Das PLC Control erlaubt die Programmierung, Verknüpfung und Bearbeitung der für die Berechnung notwendigen Variablen. Diese werden in der Ansicht „Ressourcen“ dargestellt. Die Variablen werden den jeweiligen Klemmen zugeordnet und somit mit den Ein- und Ausgängen softwaretechnisch verbunden. Die Variablen werden je nach Klemme als INTEGER-Zahl oder als REAL-Zahl dargestellt. Für Digitale Eingangs- und Ausgangsklemmen steht der BOOL Ausdruck. Für die Deklaration der Variablen steht der Ausdruck „AT%I\*“. PLC Control erlaubt das Erstellen von Funktionsbausteinen, Funktionsblöcken und Programmen. Die Funktionsblöcke können mit Eingangs- und Ausgangsvariablen versehen werden, an welche sich die Globalen Variablen anschließen können.

### 6.3.3 Bewertung der beiden Messsysteme

In diesem Kapitel gilt es die beiden vorgestellten Messsysteme miteinander FÜR DIESE ANWENDUNG zu vergleichen und zu bewerten. Zum einen das DASyLab Messsystem und zum anderen das Beckhoff Messsystem. Soll der Versuchsaufbau verifizierbare Messungen liefern können, ist eine genaue

Prüfung der beiden Methoden notwendig. Diese bestimmen die Genauigkeit, Qualität und die Quantität der weiteren Daten und Analyse der Arbeit. Die Bewertung kann mit einer Nutzwertanalyse erfolgen. Diese Methodik berücksichtigt die Wertigkeit der einzelnen Kriterien zueinander und gewichtet die Kriterien je nach ihrem Zutreffen für die jeweilige Lösung. Sie berücksichtigt die in der Literatur vorkommenden Sachverhalte und auch die subjektiven Einstellungen der Mitarbeiter zu den beiden Messsystemen.

Kriterium	Ausprägung der Lösung und Vergleich	
Lösung zur Auslesung der Daten	Beckhoff Messsystem	DASYLab Messsystem
<b>Aufwand der Berechnung</b>	Hoch, aber Möglichkeit der Automatisierung gegeben	Hoch, Datenpunkte müssen eingelesen werden
<b>Komplexität der Lösung</b>	hoher Programmieraufwand, Formeln hinterlegen	Ausschließlich Eingabe der Bausteine, vorher Formeln verknüpfen
<b>Umsetzbarkeit der Lösung</b>	komplizierte Umsetzung	schwerfällige Umsetzung
<b>Implementierbarkeit in vorh. Steuerung</b>	beliebig erweiterbar	Beschränkte Anzahl der Eingänge, zu wenig Kanäle
<b>Ausführbarkeit durch Mitarbeiter</b>	Einfach, da im Unternehmen Beckhoff Systeme vorhanden	Ausführbarkeit zufriedenstellend
<b>Detailgenauigkeit, Qualität</b>	hoch, Messpunkte genau definiert, Triggern möglich	hoch, Triggern möglich
<b>Quantität des Datenerfassung</b>	zyklusnah, aktuell	mehrere Messungen notwendig
<b>Speicherplatz</b>	hoch, Applikationen	niedrig, kleinere Datenmenge
<b>Installationsumfang, Zeit der Installation</b>	hoch, Programmierung	ausschließlich Verknüpfung der Logik Bausteine
<b>Rechnerkapazität</b>	hoch, Datenablage und Programmspeicher	niedrig, wegen kleinerer Datenmenge

Tabelle 5: Ausprägungen und Eigenschaften

Hier werden die Schwerpunkte in der Nutzwertanalyse auf die Punkte der Implementierung in die vorhandene Software, der Umsetzung an sich, die Quantität der Eingabe und schließlich die durch diese Lösung bereitgestellte Datenqualität sein. Die beiden Lösungen werden anhand dieser Kriterien eingeordnet. Dieses geschieht subjektiv und durch Erfahrungsberichte im Internet und auch durch eine Befragung der Mitarbeiter FÜR DIESE ANWENDUNG. In den Literaturangaben sind die jeweiligen

Quellen zu den Infos enthalten. Es folgen die Ausprägungszuordnung mit der Einstufung 1=ungenügend, 2=ausreichend und 3=gut. Die Einstufung kann in der beiliegenden Excel Tabelle beliebig weiter unterteilt werden. Nach der Zuordnung erfolgt die Gewichtung der Kriterien in der abschließenden Gewichtungsmatrix.

### 6.3.4 Ausprägungszuordnung je Lösung

In der folgenden Tabelle werden die beiden Lösungen anhand der aufgestellten Kriterien bewertet. Die mit der Skala 1 bis 3 werden die beiden Lösungen miteinander verglichen. Zum Vergleich werden bewusst nur zwei Stufen an Ausprägungen gewählt. Eine unterdurchschnittliche Ausprägung würde wegen der komplexen Messung der Daten den besten Sinn machen, denn die Daten müssen von Zyklus zu Zyklus nachvollziehbar sein.

Ausprägungen je Lösung	Beckhoff Messsystem	DASYLab Messsystem
<i>Aufwand der Berechnung</i>	2	1
<i>Komplexität der Lösung</i>	1	2
<i>Umsetzbarkeit der Lösung</i>	2	2
<i>Implementierbarkeit in vorh. Steuerung</i>	3	1
<i>Ausführbarkeit durch Mitarbeiter</i>	3	2
<i>Detailgenauigkeit, Qualität</i>	2	2
<i>Quantität der Eingabe</i>	3	1
<i>Speicherplatz</i>	1	2
<i>Installationsumfang, Zeit der Installation</i>	1	2
<i>Rechnerkapazität</i>	2	3

Tabelle 6: Messsystemvergleich, Ausprägungen

### 6.3.5 Gegenüberstellung der Kriterien

Kriterium	Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\Sigma$	g
<i>Aufwand der Berechnung</i>	1		1	0	0	0	0	0	1	1	1	4	0,09
<i>Komplexität der Lösung</i>	2	0		0	0	0	0	0	1	1	1	3	0,07
<i>Umsetzbarkeit der Lösung</i>	3	1	1		1	0	1	0	0	0	0	4	0,09
<i>Implementierbarkeit in vorh. Steuerung</i>	4	1	1	0		0	0	0	0	0	0	2	0,05
<i>Ausführbarkeit durch Mitarbeiter</i>	5	1	1	1	1		1	0	1	0	1	7	0,16
<i>Detailgenauigkeit, Qualität</i>	6	1	1	0	1	0		1	1	1	1	7	0,16
<i>Quantität der Eingabe</i>	7	1	0	1	1	1	0		1	1	1	7	0,16
<i>Speicherplatz</i>	8	0	0	1	1	0	0	0		0	0	2	0,05
<i>Installationsumfang, Zeit der Installation</i>	9	0	0	1	1	1	0	0	1		1	5	0,11
<i>Rechnerkapazität</i>	10	0	0	1	1	0	0	0	1	0		3	0,07
<b>Summe</b>												44	1

Tabelle 7: Messsystemvergleich, Gewichtungsmatrix

### 6.3.6 Ergebnistabelle, Nutzwertberechnung

Nutzwertanalyse Ergebnistabelle						
Kriterium	g	SPS	Dasylab		Beckhoff	Dasylab
<i>Aufwand der Berechnung</i>	0,09	2	1		0,18	0,09
<i>Komplexität der Lösung</i>	0,07	1	2		0,07	0,14
<i>Umsetzbarkeit der Lösung</i>	0,09	2	2		0,18	0,18
<i>Implementierbarkeit in vorh. Steuerung</i>	0,05	3	1		0,14	0,05
<i>Ausführbarkeit durch Mitarbeiter</i>	0,16	3	2		0,48	0,32
<i>Detailgenauigkeit, Qualität</i>	0,16	2	2		0,32	0,32
<i>Quantität der Eingabe</i>	0,16	3	1		0,48	0,16
<i>Speicherplatz</i>	0,05	1	2		0,05	0,09
<i>Installationsumfang, Zeit der Installation</i>	0,11	1	2		0,11	0,23
<i>Rechnerkapazität</i>	0,07	2	3		0,14	0,20
<b>Summe</b>	<b>1</b>				<b>2,14</b>	<b>1,77</b>
<b>Ergebnis:</b>					<b>Rang1</b>	<b>Rang2</b>

Tabelle 8: Messsystemvergleich, Nutzwertberechnung

Das Ergebnis der Nutzwertanalyse tendiert eindeutig zu der Beckhoff-Lösung. Die Kriterien „Detailgenauigkeit“, „Quantität der Eingabe“ und „Ausführung durch den Mitarbeiter“ haben auf das Ergebnis mit je Gewichtungsfaktoren (16%) einen hohen Einfluss. Die Gewichtungsfaktoren ergeben sich durch die Gegenüberstellungstabelle der Kriterien (Tabelle 7, vorherige Seite).

Es gilt die Messung vorerst mit dem Beckhoff Verfahren zu testen und Daten mit diesem System aufzunehmen und zu verifizieren. Anschließend muss über eine Automatisierung des Messsystems nachgedacht werden. Dabei werden die Vor- und die Nachteile von manueller zu automatisierter Lösung miteinander verglichen.

## 6.4 Die Parameter als Stellschrauben

Die Berechnung der Formteilqualitätsprognose, auf deren Basis eine Anpassung der Maschineneinstellung vorgenommen wird, erfolgt durch eine kommerziell verfügbare Qualitätssoftware, wie z.B. WinQS o.ä. Eine Online-Qualitätsprognose auf der Basis des aktuellen Prozesszustandes kann über ein statistisches Prozessmodell, welches den Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und den Produkteigenschaften beschreibt, ermittelt werden. Es muss ermittelt werden, welche Maschineneinstell- bzw. Prozessfolgegrößen für die Produktqualität des gerade produzierten Formteils signifikant sind. **Dieses gilt hier im Hinblick auf die Qualität, in dieser Arbeit aber auf jeden Fall eher für den Energieverbrauch bei gleichbleibend guter Qualität bei Parameteränderung!**

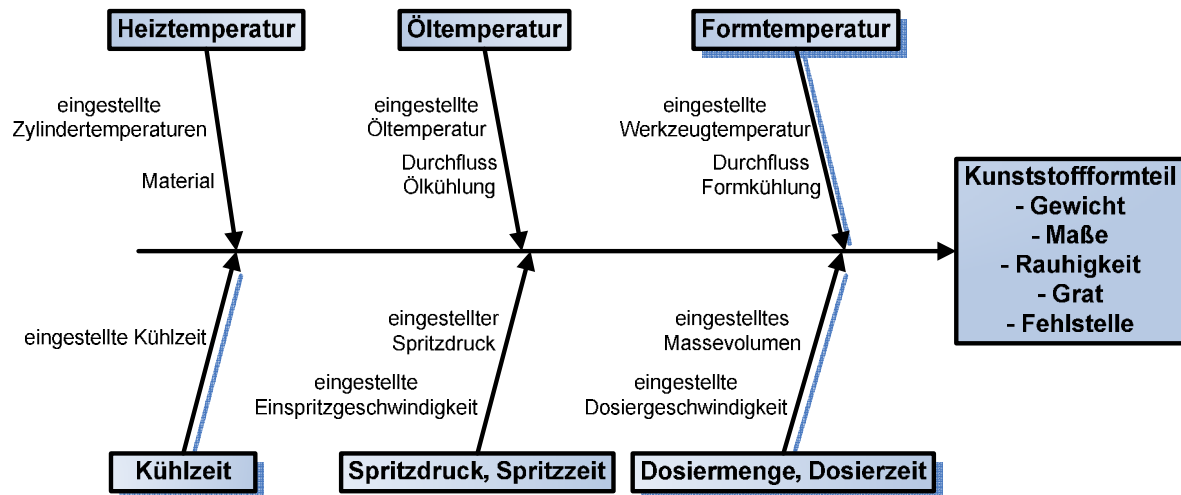


Abbildung 49: Verarbeitungsprozess vom Spritzgießen zum Formteil

Folgende Messparameter werden bei der Versuchsreihe (Raumbilanz) berücksichtigt:

<b>Messparameter:</b>		
Material Input	in Kg	
Menge Output	in Stk	Kg Teile wiegen
Volumenstrom in $\text{m}^3/\text{s}$	Volumen pro Zeit	$V/dt$
Form Kühlwasser Eintrittstemperatur	Temperatur	$T_{\text{ein gesamt}}$
Form Kühlwasser Austrittstemperatur	Temperatur	$T_{\text{aus gesamt}}$
Druck Kühlwasser Form $P_{\text{ein}}$	Druck	$P_{\text{ein pro Kanal}}$
Druck Kühlwasser Form $P_{\text{aus}}$	Druck	$P_{\text{aus proKanal}}$
Volumenstrom in $\text{m}^3/\text{s}$	Volumen pro Zeit	$V/dt$
Öl Kühlwasser Eintrittstemperatur	Temperatur	$T_{\text{ein gesamt}}$
Öl Kühlwasser Austrittstemperatur	Temperatur	$T_{\text{aus gesamt}}$
Öl Druck Kühlwasser $P_{\text{ein}}$	Druck	$P_{\text{ein pro Kanal}}$
Öl Druck Kühlwasser $P_{\text{aus}}$	Druck	$P_{\text{aus pro Kanal}}$
Antriebsstrom in A	Strom	$I$
Heizstrom in A	Strom	$I$
Klemmspannung in V	Spannung	$U$
Blind-/Wirkleistungsanteil	$\cos\varphi$	$\cos\varphi$
Strahlung (Infrarotkamera)	Oberflächentemperatur	$T_1$
Strahlung (Infrarotkamera)	Umgebungstemperatur	$T_2$
Strahlung (Infrarotkamera)	Fertigteile Temperatur	$T_3$

Tabelle 9: Labor Versuchsreinrichtung, Parameter

## 6.5 Der Laboraufbau

Der Versuchsaufbau ähnelt der im theoretischen Teil aufgestellten Bilanz. Zur Bestimmung der Energiegrößen wird eine Räumlichkeit benötigt, die alle Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen erfassen kann. Der Raum muss demnach ausschließlich durch „Schleusen“ (Energienmengen, Volumenstrommessungen) befüll- und entleerbar sein. Dadurch sind die Energieströme kontrolliert zu messen.

Es folgt in diesem Kapitel der Aufbau des Versuchsraumes in Form von Bildern der für die Versuchsreihen verwendeten Maschine, anschließend ein Raumplan (zeichnerische Darstellung). Schließlich endet dieser Teil mit dem Aufbau der Maschine und ihren Komponenten, um dann in dem messtechnischen Teil mit der Messeinrichtung und den Auswertesystem übergehen zu können. Vor dem Start der Versuchsreihen wird eine Kalibrierung der Messeinrichtung mittels Kalibrierprotokoll durchgeführt, anschließend folgen Versuchsreihen zur Modellbildung einer ersten realen Energiebilanz. Die Ergebnisse helfen das Auswertesystem weiter auszubauen und eine neue Art von Datenaufnahme zu entwickeln.

### 6.5.1 Aufbau des Versuchsraumes

Nachfolgende Bilder zeigen die beiden Maschinen im Versuchsraum. Eine Arburg 320M und eine Arburg 150. Die für diese Arbeit maßgebliche Maschine wird die erste größere Variante sein. An ihr werden Messapparaturen und Steuerungsinstrumente angebaut, die einerseits zur Überwachung des Produktionsprozessen (Soll-/Istdaten) und andererseits des Energiewandlungsprozesses (elektrisch und thermodynamisch) dienen.



Abbildung 50: Laborraum, Maschine 1





Abbildung 51: Laborraum, Maschine 2

Der folgende dargestellte Laborplan zeigt die genaue Positionierung der beiden Maschinen, sowie der Steuerungs- und Messsysteme zur Auswertung der Daten (Die zweite Maschine (2) wird mit ihren Komponente nicht weiter betrachtet, wird aber der Vollständigkeit als Raumgegenstand aufgenommen).<sup>12</sup>

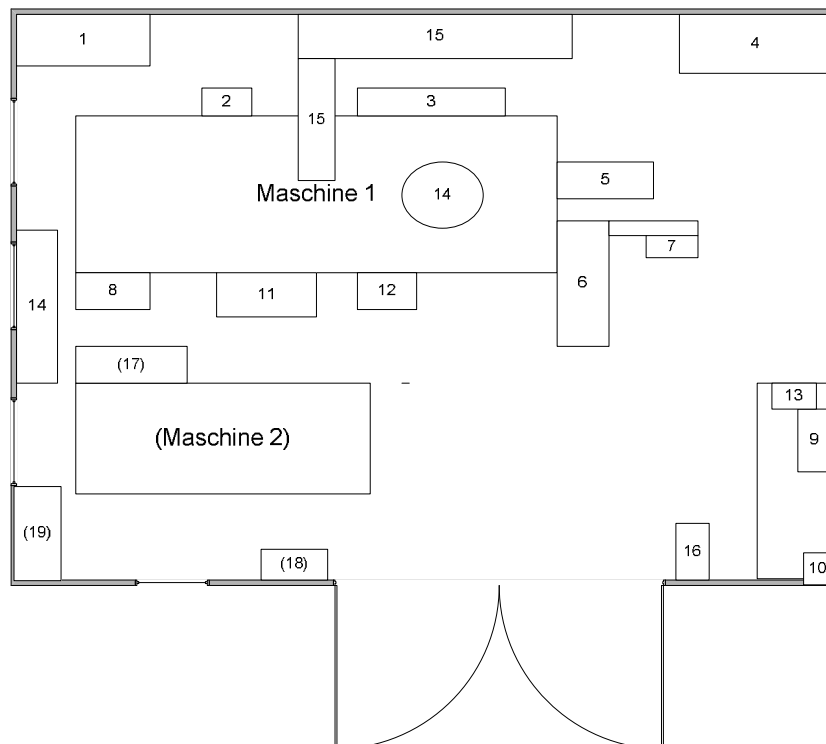


Abbildung 52: Laborplan

<sup>12</sup> Die Eigenschaften und Aufbau der Raumisolierung sind im Anhang mit der Wärmeübertragung zum Erdreich als Beispiel aufgeführt!

### Bezeichnungen der Raumkomponenten

1. Druckmessung und Volumenstrommessung Form-/Ölkühlung
2. Wasserventil (regelbar) für Durchfluss Ölkühlung
3. Durchflussmessung Formkühlung
4. Stromzähler für Heizungs- und Antriebsleistung
5. Elektrische Maschine ASM
6. Maschinensteuerung
7. SPS-Messsystem
8. Messung Schließkraft
9. Rechner für SPS-Messsystem
10. Rechner für Einlesen der Soll-/Istdaten
11. Auffangkorb produzierte Teile
12. Messung Öltemperatur (Richtwert)
13. Waage für produzierte Teile
14. Rohmaterial (im Raum)
15. Absaugvorrichtung
16. Zuluft von außen

Nicht relevant:

17. Steuerung Maschine 2
18. Druck-/Volumenstromregelung für Kühlwasser Form-/Ölkühlung Maschine 2
19. Stromzähler (Heizung und Antrieb) Maschine 2

Auf die Komponenten mit ihrer Ordnungszahl wird im weiteren Verlauf dieser Dissertation weiter eingegangen werden. Die Komponenten dienen zur Verifizierung der später folgenden Ergebnisse und zur Übernahme in eine später folgende automatische Auswertungsmethodik.

### 6.5.2 Aufbau der Maschine

Die Installation einer von Messsensorik macht es unumgänglich den genauen Aufbau der Maschine zu verstehen. Die Datenherkunft kann aus vier Teilen abgeleitet werden:

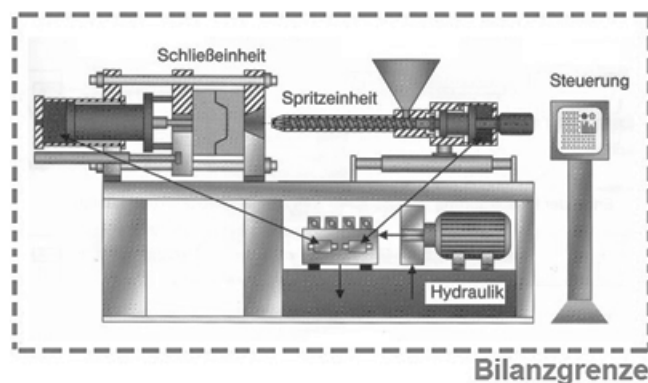


Abbildung 53: Schematischer Aufbau der Labormaschine

1. Die Schließereinheit mit der Form und dem Auswerfer-Mechanismus
2. Die Spritzeinheit mit dem Spritzzylinder und der innenliegenden Schnecke sowie der Massetrichter
3. Die Hydraulik mit den Ventilen, Regel- und Haltepumpe sowie der elektrische Antrieb ASM<sup>13</sup>
4. Die Steuerung zur Parametereingabe (Soll-/Ist-Datenerfassung), Prozesseinstellungen usw.

### 6.5.3 Aufbau der Messeinrichtung, Sensorik an der Maschine

Zur Aufnahme der Wasserdaten (Durchfluss und Druck) werden Wärmemengenzähler bestehend aus den Komponenten Durchflussmesser und Temperaturfühler (Vor-/Rücklauftemperatur) verwendet. Dies ist ebenso bei der Messung des Durchflusses der Hydrauliköl-Wärmemenge der Fall. Der Unterschied der beiden Wärmemengenzählersysteme ist die Messung des Durchflusses. Die Aufnahme der Wassermenge geschieht durch Wasseruhren, die sich analog mit dem Auge ablesen lassen. Die Messung des Durchflusses der Hydraulikflüssigkeit geschieht durch den Einsatz von speziellen Turbinen, welche sich je nach Durchfluss schneller oder langsamer drehen. Die Aufnahme der Durchflussmenge erfolgt mit einem speziellen Messgerät, an dem die Turbinen angeschlossen werden.

Abbildung 54 zeigt den Aufbau der Durchflussmengenähler für die Formkühlung. Im Gegensatz zu der mit den Wasseruhren gemessenen gesamten Durchflussmessung werden für die einzelnen Formkanäle einzelne Durchflussmesser angebracht. Dieses dient auch der Verifizierung der gesamten Durchflussmenge für das Formkühlungssystem.

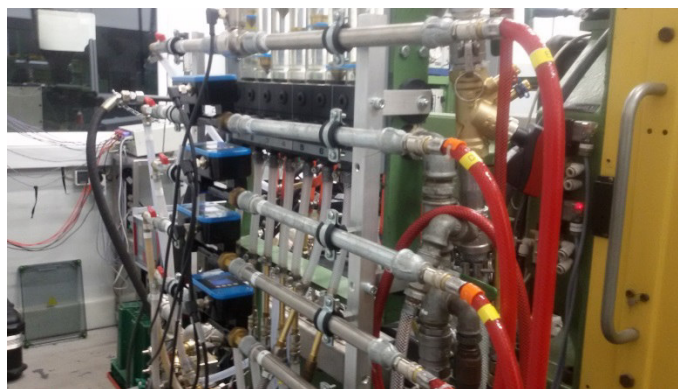


Abbildung 54: Durchflusssensoren der Firma SICK, Messung Formkühlung-Durchfluss

Die Abbildung 55 zeigt die Verschaltung der Messturbinen für den Hydraulikölkreislauf. Der Aufbau der Maschine mit Regel- und Haltepumpe macht die Verwendung zweier Messturbinen für den

<sup>13</sup> ASM bezeichnet eine Asynchronmaschine (Erklärung im Glossar, Anhang unter 13.1, S.195)

Regel- und den Haltepumpenkreislauf notwendig. Mit ihnen werden später in den Versuchsreihen die Größen für eine Berechnung der Förderleistung und der Wärmeleistung beider Pumpen gemessen um eine Bilanzierung einzelner Prozessschritte in Bezug auf den Antrieb vornehmen zu können. Die Ergebnisse der Messturbinen sind noch nicht verifiziert. Es bedarf noch eines Abgleiches und einer Kalibrierung. Das Messgerät der Messturbinen besitzt eine variable Einstellung der Durchflussanzeige bei 0-Liter-Durchgang. Demzufolge müssen die Turbinen mit einer anderen Turbine abgeglichen werden um aussagekräftige Ergebnisse für die Auswertung in dieser Dissertation verwenden zu können. Darauf soll im folgenden Kapitel nun eingegangen werden. Die folgende Abbildung zeigt vorerst die Schaltung der Turbinen im Messmodus: die obere blaue Turbine für die Messgrößen der Haltepumpe und die untere silberne Turbine für die Regelpumpe.

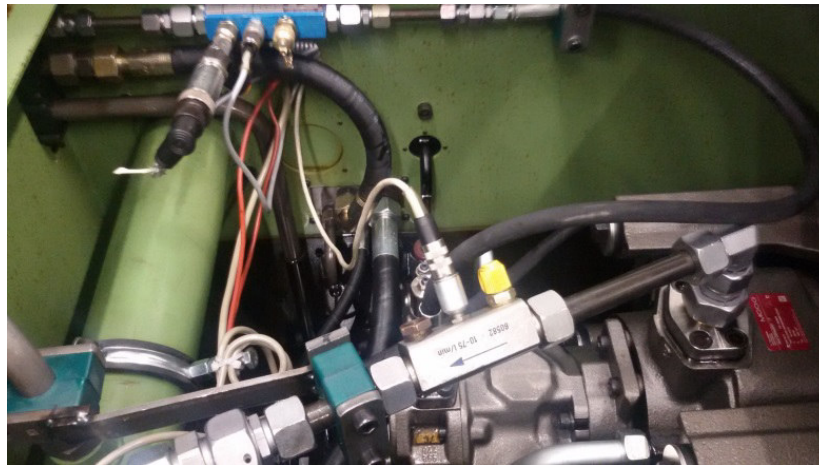


Abbildung 55: Durchflusssensoren Hydrauliköl

#### 6.5.4 Aufbau der Messeinrichtung, Datenaufnahmesystem

Das Datenaufnahmesystem besteht aus einer SPS mit einer CPU im Rechner und mehreren Eingangs- sowie Ausgangsklemmen. Die Eingangsklemmen werden mit den einzelnen Temperatur- und Drucksensoren verbunden. Die Informationen für die von der Maschine zurückgelegten Wege werden von den Weggebern (Potentiometern) abgegriffen und mittels Trennverstärker auf die Eingangsklemme (Spannungsklemme) der SPS gegeben. Die Trennverstärker sorgen für verlustfreie Übertragung und verhindern Beeinflussung der Messergebnisse für die Steuerung des Produktionsprozesses.<sup>14</sup> Messungen im Vorversuch bringen als Ergebnis verschiedene negative Einflüsse auf die Ist-Datenerfassung des Produktionsprozesses von parallelgeschalteten Messklemmen zur Steuerung. Die Wegpunkte erschienen im Vorversuch auf der Steuerung durch einen Parallelwiderstand der Eingangsklemme um einen bestimmten Betrag versetzt. Die Ergebnisse

<sup>14</sup> Darauf wird im Kapitel 6.5.7 "Kalibrierung der Weggeber" eingegangen.

sind für eine Messung demnach unbrauchbar. Mittels Trennverstärker wird ein hoher Eingangswiderstand erreicht. Die SPS-Steuerung liefert annähernd gleiche Messwerte wie die Steuerung der Maschine. Die Ergebnisse sind demnach verifiziert.

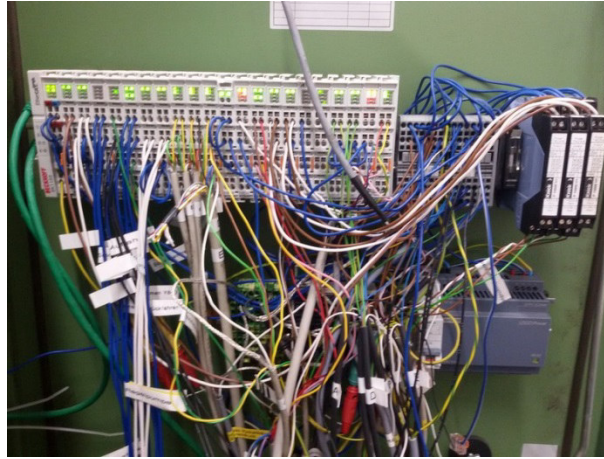


Abbildung 56: Beckhoff Labor-Messsystem mit Netzteil

### 6.5.5 Kalibrierung des Hydrauliköl-Durchflusssystems

Für die Kalibrierung der Hydrauliköl-Durchflussmessturbinen ist eine Reihenschaltung aller drei Turbinen in die Durchflussleitung der Maschine mit dem größten Querschnitt (ausgehend von der größten Pumpe) erforderlich. Verwendet werden die beiden für die späteren Messungen erforderlichen Messturbinen und eine von Hersteller kalibrierte Messturbine mit verwendbaren SPS-Ausgang (4-20mA für Eingangsklemme).

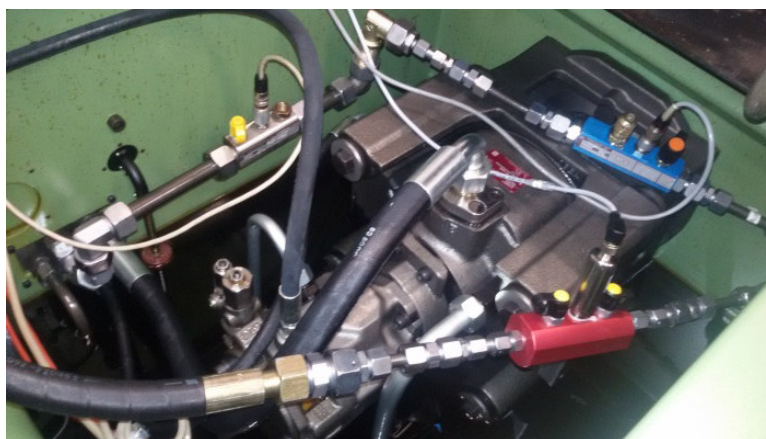


Abbildung 57: Kalibrierung Öldurchfluss-Messsystem

Mit dieser Reihenschaltung werden mehrere Messbereiche durchgefahren und die Werte aller drei Turbinen miteinander verglichen. Die beiden Messturbinen werden auf den richtigen Kalibrierwert gestellt. Anschließend wird durch weitere Messungen die Genauigkeit der Messturbinen

(Abweichung der beiden Messturbinen zur Herstellerturbine) ausgemessen. Es wird eine Abweichungsanalyse erstellt. In Abbildung 57, vorherige Seite, ist der Aufbau auf einem Foto gezeigt.

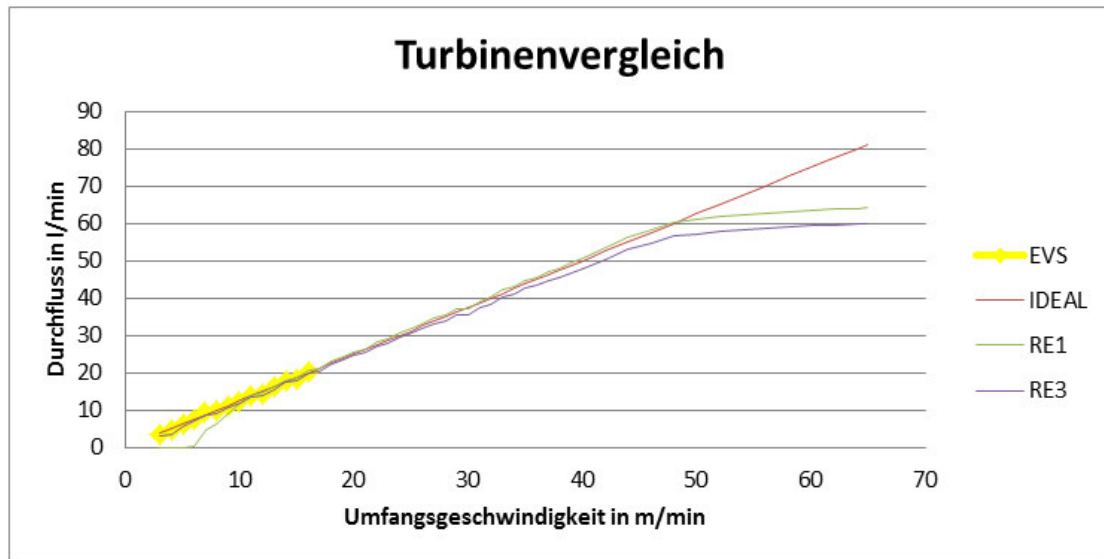


Abbildung 58: Kalibrierung Durchflussturbinen

Die Turbine RE1 (grüne Linie) beginnt erst ab einem Bereich von 10 l/min genaue Ergebnisse zu liefern. Die RE3 (blaue Linie) zeigt schon ab 3 l/min gute Werte an. Die gelbe Linie ist die Referenzturbine EVS und wird zum Abgleich der anderen Turbinen bis ca. 20 l/min verwendet. Werden die Drehzahleinstellungen und die EVS Turbine in Beziehung gesetzt, ergibt sich zwischen den beiden Größen ein Proportionalitätsfaktor von 1,25. Mit dieser wird in eine Funktionsgleichung  $IDEALLINE = 1,25 \cdot u$  gesetzt. U steht für die Umfangsgeschwindigkeit des Dosiermotors. Mit dieser Gleichung lässt sich die rote Linie als Referenzlinie für größere Durchflussmengen als 20 l/min herleiten. Der Grund ist die maximale Durchflussmenge für die rote EVS Turbine (gelbe Linie). Jedoch lassen die anderen beiden Turbinen größere Durchflüsse bis zu 70 l/min zu. Die Labormaschine bewegt sich im Betrieb bei Durchflussgrößen um die 10 bis 60 Liter. Deshalb bedarf es einer Kalibrierung des Turbinensystems von Durchflussgrößen in diesem gesamten Bereich.

### 6.5.6 Kalibrierung der Absaugvorrichtung (Luftvolumenstrommessung)

Die Messung des Volumenstromes wird in diesem Abschnitt durchgeführt. Die Absaugeinrichtung wird an einer Stelle (dem Lufteinlauf) mit einem Loch in der Mitte des Rohres versehen. In dieses wird die Messspitze eines Luftstromsensors eingeführt. Dieser wird senkrecht zur Öffnung gehalten. Die Einstellung des Ventilators erfolgt mit steigender Frequenz. Es wird anschließend nach jeder Frequenzeinstellung der Volumenstrom aufgenommen. Die Messung des Volumenstromes in Abhängigkeit der Frequenz des Lüftungsmotors bringt einen steigenden Volumenstrom mit steigender Frequenz hervor.



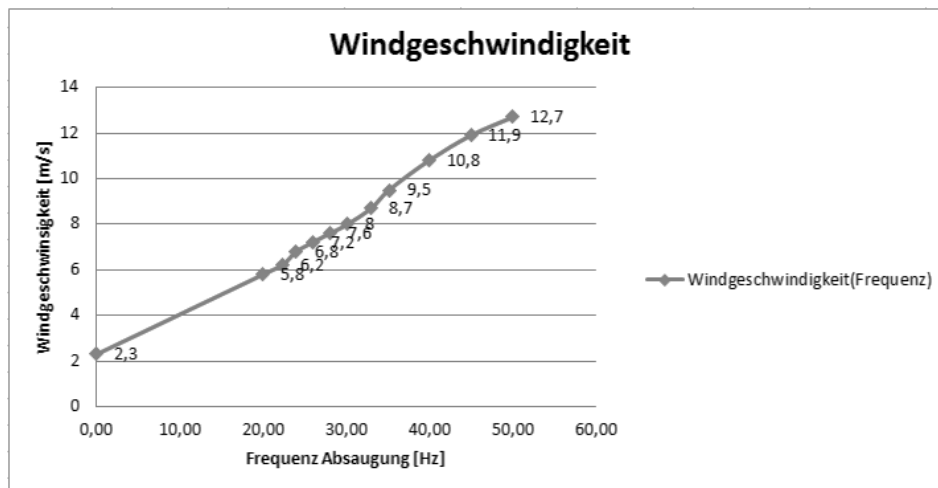


Abbildung 59: Kalibrierung Luftvolumenstrommessung, Diagramm Windgeschwindigkeit

Dieses war zu erwarten. Mit steigender Frequenz dreht der Ventilator sich schneller und bringt somit einen höheren Volumenstrom. Die Ergebnisse entnehmen Sie bitte der tabellarischen Aufstellung im Anhang unter 13.5.3, S.207. Die Volumenstrommessung ergibt mit dem zugehörigen Rohrquerschnitt einen Luftstrom von ca.  $0,24\text{m}^3/\text{s}$ . Der Betrag wird bei 50Hz Einstellung am Ventilator konstant in jede Messung übernommen. Zu dem Diagramm muss ergänzt werden, dass sich Windgeschwindigkeiten kleiner als  $5,8\text{m/s}$  wegen der Annahme einer Minimaldrehzahl zum Motorschutz bei 20Hz nicht realisieren lassen. Die Asynchronmaschine der Lüftung lässt aufgrund der Wärmeentwicklung im Ständer durch Eisen- und Magnetisierungsverluste nur Frequenzen größer als 20Hz und kleiner als 60Hz zu. Dementsprechend wurde der Regelbereich von 20Hz bis 50Hz in dem Frequenzumrichter einprogrammiert.

### 6.5.7 Kalibrierung der Weggeber (Einspritzweg)

Die Kalibrierung der Weggeber für den Einspritz- und den Auswerferweg wird am Beispiel des Weggebers im Folgenden beschrieben. Es wird eine maximale Strecke (maximal technisch möglich) mit der Maschine für den Einspritzvorgang abgefahren. Die Volumina -1 für die 0-Stellung und 179,7 für die Endstellung werden an der Maschine bei den Endpositionen angezeigt. Das Signal des Weggebers wird auf eine Strommessklemme gegeben. Für die Endstellung erscheint der Wert  $8,48\text{mA}$ .

Einspritzvolumen [ $\text{cm}^3$ ]	Integer Wert	Strom [mA]	Wegstrecke [cm]
-1	25540	1,65	0
179,7	9127	8,48	14,30

Tabelle 10: Kalibrierungseinstellung Weggeber Einspritzweg

Bis zur Endstellung werden 14,3cm gefahren. Die Strecke wird mit dem Messschieber an der Maschine nachgemessen und die Steuerung wird dementsprechend auf das Maximum 14,3cm abgeglichen.

Es wird darauf ein Dosierwert von  $35\text{cm}^3$  eingegeben. Die Maschine fährt darauf eine Strecke von 2,746cm. Mit einer Schneckenkolbenfläche von  $12,57\text{cm}^2$  ausgehend vom Durchmesser des runden Schneckenkolbens von 4cm wird Massevolumen von  $34,51\text{ cm}^3$  laut der SPS Steuerung eingespritzt.

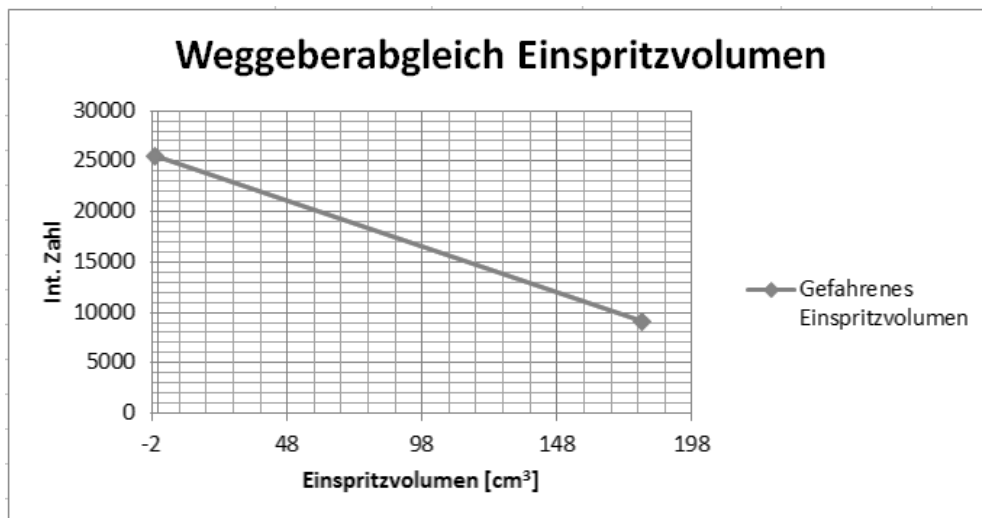


Abbildung 60: Einspritzvolumen mit Integer-Wert aus SPS-Messklemme

Die Abweichung zwischen eingestelltem Dosiervolumen von  $35\text{cm}^3$  und dem durch den gefahrenen Einspritzweg und der Schneckenkolbenfläche errechnetem Dosiervolumen beträgt 1% und ist vernachlässigbar. Die Messungen können somit durchgeführt werden. Die Abweichungen sind auf die parallel zur Steuerung angeschlossenen Messverstärker (durch Parallelschaltung ihres eigenen Innenwiderstandes) zurückzuführen und können nicht weiter minimiert werden. Der Abgriff erfolgt bereits durch galvanische Trennung zwischen Steuerung und Messsystem.

Fläche der Schnecke [cm <sup>2</sup> ]	12,57
Durchmesser innen [cm]	4
Probe, eingestelltes Dosiervolumen [cm <sup>3</sup> ]	35,00
Gefahrener Einspritzweg (Weggeber) [mm]	Dosiervolumen [cm <sup>3</sup> ]
27,46	34,51
Abweichung	1%

Tabelle 11: Proberechnung aus mit Verifizierungswerten der Kumulation



## 6.6 Durchführung der Versuchsreihen, Vorversuche

Die folgenden Versuchsreihen stellen das Grundgerüst zur weiteren Automatisierung und der anschließenden Parameterveränderung dar. Zur Bestimmung der Energiebilanz wird die Maschine tabellarisch in fünf Energiekomponenten eingeteilt, diese werden anschließend aufgenommen.

### 6.6.1 Versuchsreihe 1: Energiegrößen bestimmen, Energiebilanz aufstellen für den Messraum

<b>Energiebilanz</b>	Beginn Uhrzeit	14:57	Ende Uhrzeit	15:55	00:58	3500
Anzahl Schuss	100 Stück			min	Sec.	

<b>Heizung</b>		<b>(Wirkarbeit2-Wirkarbeit1)/Anzahl Schuss</b>		<b>Ergebnis</b>		<b>mittlere Leistung in kW</b>
$W_{EL,H}$		Wirkarbeit 1 [kWh]	Wirkarbeit 2 [kWh]			
		18,92	19,9	0,0098 kWh/Schuss		

<b>Antrieb</b>		<b>(Wirkarbeit2-Wirkarbeit1)/Anzahl Schuss</b>		<b>Ergebnis</b>		<b>mittlere Leistung in kW</b>
$W_{EL,M}$		Wirkarbeit 1 [kWh]	Wirkarbeit 2 [kWh]			
		244,97	250,37	0,054 kWh/Schuss		

<b>Kühlung Form</b> $(\text{Volumen2}-\text{Volumen1}) \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Rücklauf}}-T_{\text{Vorlauf}}) / \text{Anzahl Schuss}$					
$Q_{\text{Form}}$	Volumen 1 [m³]	Volumen 2 [m³]	$T_{\text{vorlauf}}$ [°C]	$T_{\text{rücklauf}}$ [°C]	
	6,76	7,5	19,9	20,3	
	Ergebnis				<b>mittlere Leistung in kW</b>
	0,0034369 kWh/Schuss				<b>-0,4</b>

Kühlung Öl	(Volumen2-Volumen1)*rho*cp*(T <sub>Rücklauf</sub> -T <sub>Vorlauf</sub> )/Anzahl Schuss					
Q <sub>Form</sub>	Volumen 1 [m³]	Volumen 2 [m³]	T <sub>vorlauf</sub> [°C]	T <sub>rücklauf</sub> [°C]		
	7,224	7,75	20	24,6		
	Ergebnis					mittlere Leistung in kW
	0,0280942 kWh/Schuss					-2,9

Abwärme Luft						$v \cdot A \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Ausgang, Luft}} - T_{\text{Eingang, Luft}}) \cdot (t_2 - t_1 / \text{Anzahl Schuss})$	
Q <sub>Abwärme, Luft</sub>	t1 [s]	t2 [s]	T <sub>Ausgang, Luft</sub> [°C]		T <sub>Eingang, Luft</sub> [°C]	mittlere Leistung in kW	
	0	0,9722	26,5				
Volumenstrom							Ergebnis
v Luft [m/s]	A Fläche [m <sup>2</sup> ]	[m/s]					
12	0,018865631	0,2264	0,017488	kWh/Schuss	-1,8		

**Energiebilanz**

$W_{EL,H}$	$W_{EL,M}$	$Q_{Form}$	$Q_{Öl}$	$Q_{Abwärme, Luft}$	$Q_{Wände}$
0,0098	0,054	-0,00343	-0,02809	-0,01748	-0,01264
kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss
In	0,0638	kWh/Schuss	Out	0,06165	kWh/Schuss
			97% Anteil		

**Leistungsbilanz**

$P_{EL,H}$	$P_{EL,M}$	$Q_{Form}$	$Q_{Öl}$	$Q_{Abwärme, Luft}$	$Q_{Wände}$
1,01	5,55	-0,4	-2,9	-1,8	-1,3
kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss
In	7,41	kW/Schuss	Out	8,2	kW/Schuss
			97% Anteil		

Tabelle 12: Vorversuchsreihe 1, Energiebilanz manuell Produktionsbetrieb

**6.6.2 Versuchsreihe 2: Bestimmung der Antriebsgrößen im Leerlauf<sup>15</sup>**

<b>Energiebilanz</b>	Beginn Uhrzeit	19:57	Ende Uhrzeit	20:55	00:58	3500
Anzahl Schuss	100 Stück			min	Sec.	

Heizung	(Wirkarbeit2-Wirkarbeit1)/Anzahl Schuss		Ergebnis	mittlere Leistung in kW
$W_{EL,H}$	Wirkarbeit 1 [kWh]	Wirkarbeit 2 [kWh]		
	20,92	20,92	0,0000 kWh/Schuss	0,00

Antrieb	(Wirkarbeit2-Wirkarbeit1)/Anzahl Schuss		Ergebnis	mittlere Leistung in kW
$W_{EL,M}$	Wirkarbeit 1 [kWh]	Wirkarbeit 2 [kWh]		
	354,95	359,94	0,0499 kWh/Schuss	5,13

Kühlung Form	(Volumen2-Volumen1)*rho*cp*(T <sub>Rücklauf</sub> -T <sub>Vorlauf</sub> )/Anzahl Schuss				mittlere Leistung in kW
$Q_{Form}$	Volumen 1 [m <sup>3</sup> ]	Volumen 2 [m <sup>3</sup> ]	T <sub>Vorlauf</sub> [°C]	T <sub>Rücklauf</sub> [°C]	
	8,56	9,2	19,9	20,1	
	Ergebnis				
	0,0014862 kWh/Schuss				-0,2

Kühlung Öl	(Volumen2-Volumen1)*rho*cp*(T <sub>Rücklauf</sub> -T <sub>Vorlauf</sub> )/Anzahl Schuss				mittlere Leistung in kW
$Q_{Form}$	Volumen 1 [m <sup>3</sup> ]	Volumen 2 [m <sup>3</sup> ]	T <sub>Vorlauf</sub> [°C]	T <sub>Rücklauf</sub> [°C]	
	10,23	10,74	20	24	
	Ergebnis				
	0,0239653 kWh/Schuss				-2,5

<sup>15</sup> Im Anhang eine detaillierte **Übersicht der Leerlaufergebnisse** im Anhang unter 13.6, S.208

Abwärme Luft				
$\dot{V} \cdot A \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Ausgang, Luft}} - T_{\text{Eingang, Luft}}) \cdot (t_2 - t_1 / \text{Anzahl Schuss})$				
$Q_{\text{Abwärme, Luft}}$	$t_1$ [s]	$t_2$ [s]	$T_{\text{Ausgang, Luft}}$ [°C]	$T_{\text{Eingang, Luft}}$ [°C]
	0	0,9722	24,5	19,8
		Volumenstrom		
$\dot{V}$ Luft [m/s]	A Fläche [m <sup>2</sup> ]	[m/s]	Ergebnis	
12	0,018865631	0,2264	0,0122677 kWh/Schuss	
				<b>mittlere Leistung in kW</b>
				<b>-1,3</b>

## Energiebilanz

$W_{\text{EL,H}}$	$W_{\text{EL,M}}$	$Q_{\text{Form}}$	$Q_{\text{Öl}}$	$Q_{\text{Abwärme, Luft}}$	$Q_{\text{Wände}}$
0,000	0,0499	-0,00148622	-0,02396	-0,0122677	-0,009722
kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss	kWh/Schuss
In	0,0499 kWh/Schuss	Out	0,04744 kWh/Schuss	97% Anteil	

## Leistungsbilanz

$P_{\text{EL,H}}$	$P_{\text{EL,M}}$	$Q_{\text{Form}}$	$Q_{\text{Öl}}$	$Q_{\text{Abwärme, Luft}}$	$Q_{\text{Wände}}$
0	5,13	-0,2	-2,5	-1,3	-1,0
kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss	kW/Schuss
In	7,41 kW/Schuss	Out	8,2 kW/Schuss	97% Anteil	

Tabelle 13: Vorversuchsreihe 2, Energiebilanz manuell Leerlauf

$$\dot{Q}_{\text{Kühlwasser}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Rücklauf}} - T_{\text{Vorlauf}}) \quad (6.1)$$

Beispiel in Vorversuch 1, Leistung der Formkühlung:

$$\dot{Q}_{\text{Kühlwasser Form}} = (7,5\text{m}^3 - 6,76\text{m}^3) \cdot \frac{1000\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{4,18\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \frac{20,3\text{K} - 19,9\text{K}}{3500\text{s}} = 0,4\text{kW}$$

Beispiel in Vorversuch 1, Leistung der Ölkühlung:

$$\dot{Q}_{\text{Kühlwasser Öl}} = (7,75\text{m}^3 - 7,224\text{m}^3) \cdot \frac{1000\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{4,18\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot \frac{24,6\text{K} - 20\text{K}}{3500\text{s}} = 2,9\text{kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{Lüftung}} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{\text{Abluft}} - T_{\text{Zuluft}}) \quad (6.2)$$

Beispiel in Vorversuch 1, Leistung Raumlüftung:

$$\dot{Q}_{\text{Luft Raum}} = 0,23 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{1,005\text{Kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1,18\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot (26,5 - 19,8)\text{K} = 1,8\text{kW}$$

### 6.6.3 Versuchsreihe 3: Prozessbilanz zweier formbestimmender Prozessschritte (Einspritzen und Plastifizieren)

Der Hydraulikdruckkurve ist zu entnehmen, dass die Fläche unter der Einspritzkurve und der Plastifizierkurve sehr groß ist. Das Schließen des Werkzeuges verursacht zwar große Spitzen, wird aber im letzten Teil der Dissertation extra untersucht werden. Die Werte im folgenden Graphen (Abb. 61) werden aufgenommen. Sie zeigen den Hydraulikdruck und den Einspritzweg über der Zeitachse in ms. Der Einspritzweg (rote Kurve) beginnt erst ab ca. 13000ms sich zu ändern. Es findet eine sehr starke Wegänderung statt, somit geht die Kurve steil nach oben. An dem Punkt, an dem auch der Hydraulikdruck ein Maximum hat, verändert sich die Steigung der Wegänderung und eine flachere Bahn für den Nachdruck wird abgefahren. Die Wegänderung erfolgt demnach sehr langsam.

Anschließend erfolgt das Dosieren (im Diagramm ab ca. 18000ms) und die Wegänderung wird negativ wieder zurück zum Ursprungszustand (fallende Gerade). Die Fläche unter der Hydraulikdruckkurve beim Dosieren ist ebenfalls sehr groß. Auch dieser Vorgang soll in Arbeit genauer betrachtet werden.

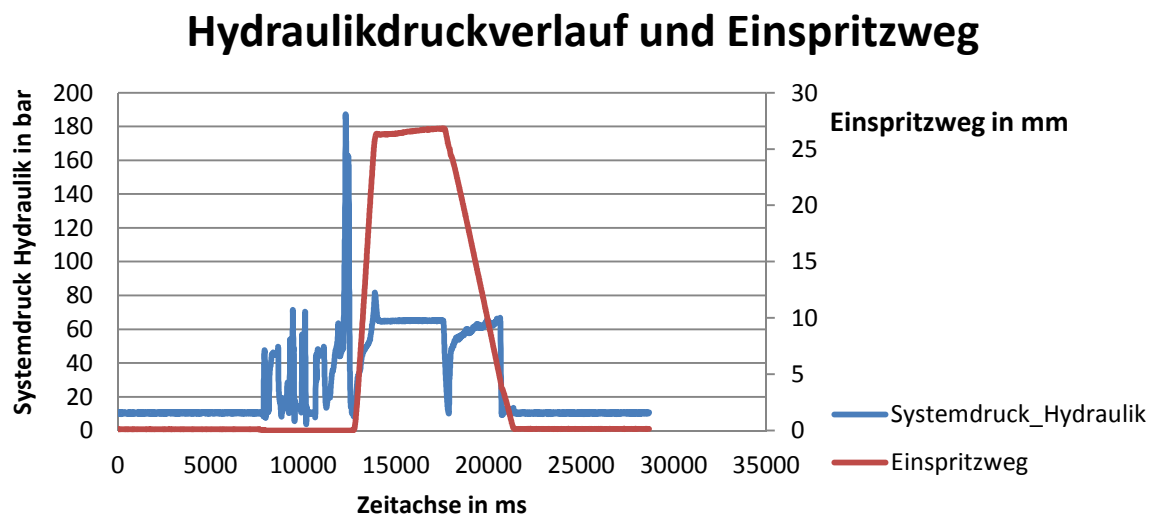


Abbildung 61: Verlauf Hydraulikdruck und Einspritzweg

Zur Datenaufnahme müssen die in den Grundlagen beschriebenen Formeln<sup>16</sup> der Einspritzarbeit und der Plastifizierarbeit herangezogen werden. Es müssen demnach für die hydraulische Einspritzarbeit die Daten des Hydraulikdruckes, der Wegänderung und der konstanten Ringkolbenfläche in der Maschine zur Verfügung stehen. Für die elektrische Plastifizierarbeit sind die elektrische Leistung und

<sup>16</sup> Dem Grundlagenteil unter Kapitel 3.5.1 (S.48) und 3.5.2 (S.49) zu entnehmen!

die Ablaufzeit notwendig. Für die hydraulische Plastifizierarbeit ist ein Leistungswert (elektrisch oder hydraulisch) und die Zeit wichtig.

Die Werte werden in einer Versuchsreihe in langsamerer Einstellung aufgenommen und mit der o. g. Software Scilab wird ein Interpolationspolynom durch die Hydraulikkurve bei der Einspritzarbeit über den Weg und die Leistungskurve bei der Plastifizierarbeit über die Zeit gelegt. Die Flächen werden anschließend integriert.

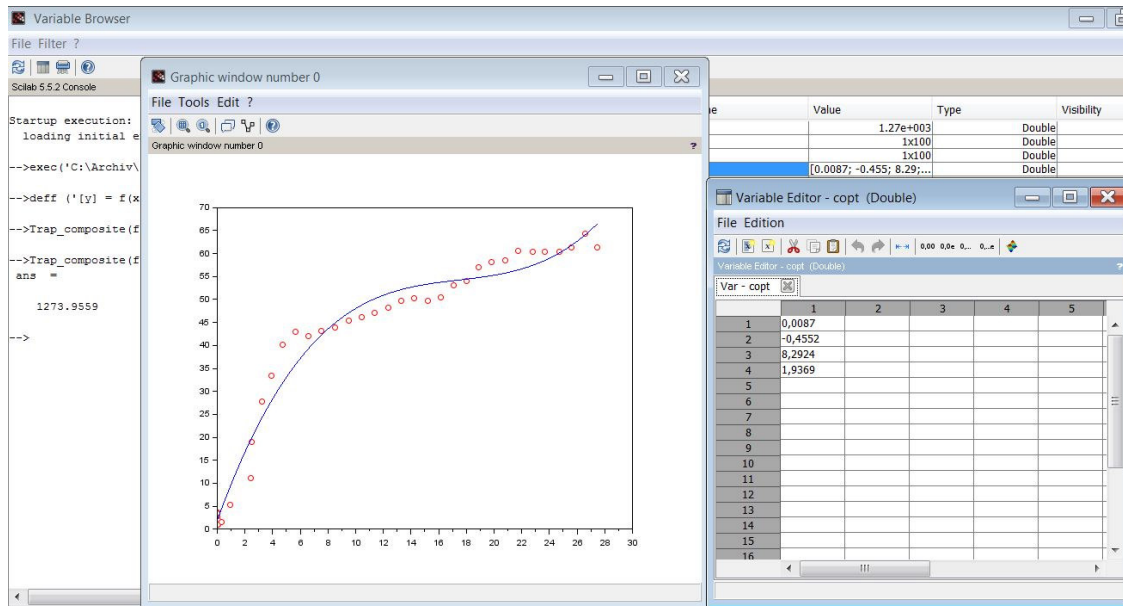


Abbildung 62: Einspritzarbeit, kumuliert in Scilab

Die Werte werden in einem Excel-Diagramm dargestellt:

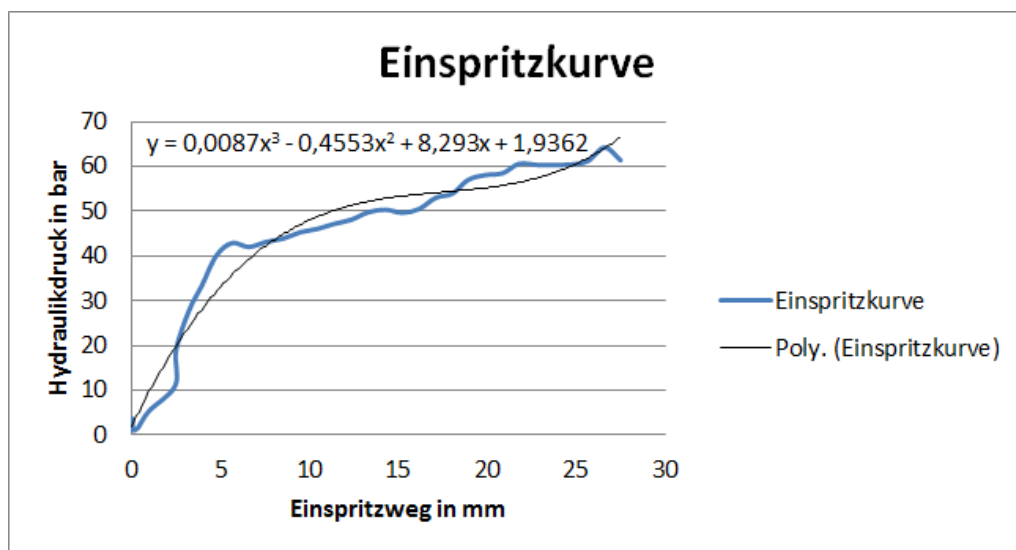


Abbildung 63: Einspritzkurve mit Ausgleichsfunktion

Die Software gibt eine Einspritzarbeit von 1155Ws (ausgehend von Wert 1273,95, Abb. 62 links) ohne Flächenmultiplikation) an. Die Multiplikation mit der Kolbenfläche wird in Excel ausgeführt, sowie eine manuelle Flächenberechnung. Das Ergebnis beläuft sich auf 1293Ws. Dieses entspricht einer Abweichung von 10%. Wird die Berechnung mittels eines Bausteins der Kumulation in der SPS direkt durchgeführt, liegt das Ergebnis bei 1293Ws. Das manuell ermittelte Ergebnis entspricht demnach dem mit der SPS Kumulation (speicherprogrammierbare Steuerung) errechneten Ergebnis. Es werden demnach die richtigen Werte aus der SPS angegeben. Die Abweichung zu der Berechnung in SCILAB liegt an der ungenaueren Interpolation und der anschließenden numerischen Integration der Funktion.

Die Methodik der direkten Kumulation mittels programmierten SPS-Funktionsblock ist demnach für eine Kumulation der Energiegrößen geeignet. Dieses Verfahren wird noch einmal für einen Plastifizierungsvorgang wiederholt. Die Abweichung zu der SCILAB Berechnung sind dort nur 2%. Zwischen einer manuellen Kumulation und der SPS-Kumulation sind wieder kaum Abweichungen (unter 1%) vorhanden. Für die Berechnung der Leistung des Dosiermotors wird die SPS mit einer Umrechnung entsprechend der folgenden Formel [40] programmiert:

$$M = \frac{(\text{Verdrängung} \cdot \Delta p_H)}{62,8} \quad [Nm] \quad (6.3)$$

mit  $p_H$ = Hydraulikdruck, Verdrängung [40] für diesen Motor in Arburg 320:= 159,7cm<sup>3</sup>

$$P_{Hydr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_m \cdot M}{60s \cdot 1000} \quad [kW] \quad (6.4)$$

mit  $n_m$ = Drehzahl (aus Frequenzzähler<sup>17</sup> ermittelt)

Wird eine erste Versuchsreihe mit Aufnahme der Arbeit ausgehend vom elektrischen Energieverbrauch beim Einspritzen und Plastifizieren gefahren und wird anschließend der hydraulische Energieanteil gegenübergestellt, ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Die Ergebnisse des Vorversuches zeigen einen Anteil von 100% elektrischer Energie mit 16,25kWs. Die Regelpumpe liefert die für die Plastifizierung notwendige hydraulische Energie mit 4,9kWs. Die Haltepumpe liefert den notwendigen Schließdruck mit 0,6kWs Arbeit (4%). Der Dosiermotor wird von der Regelpumpe angetrieben und im Vergleich zum Input entspricht dieses einem Deckungsanteil von 26%.

<sup>17</sup> Siehe Anhang 13.18: PLC aus eigener Programmierung für die Arbeit

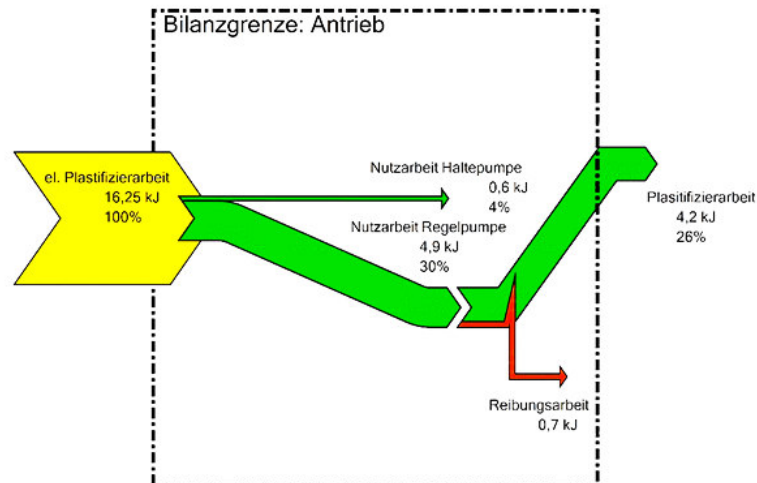


Abbildung 64: Plastifizierarbeit, Ermittlung aus Vorversuchsreihen

Die Ergebnisse des Einspritzversuches zeigen ähnliche Ergebnisse wie beim Dosiervorgang. Hier nähern sich aber Regelpumpe und Haltepumpe aneinander an. Sie haben anteilmäßig nur 9% Unterschied. Bei Dosieren war der Unterschied 26%. Die Einspritzzeit entspricht (lt. Maschineneinstellungen) etwa der Hälfte der Dosierzeit. Die Regelpumpe liegt mit 1,05 kW bei ca. 14% Anteil von der elektrischen Energie. Die Haltepumpe liegt bei ca. 5% wie auch im vorherigen Versuch. Gedeckt wird die elektrische Arbeit von nur 11% hydraulischem Anteil. Nur 10% werden in der Maschine hydraulisch für das Einspritzen direkt umgesetzt (ausschließlich das Verschieben der Schnecke für den Spritzvorgang). Das sind 0,78kW hydraulisch zu 7,2kW elektrisch.

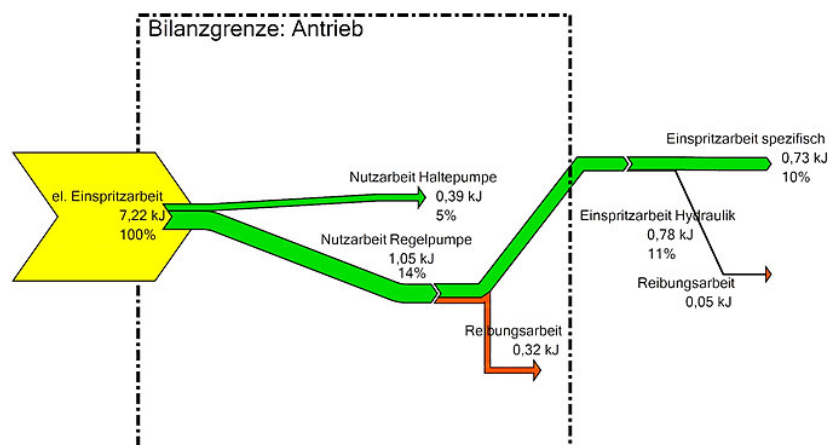


Abbildung 65: Einspritzarbeit, Ermittlung aus Vorversuchsreihen

Abschließend ist zu erwähnen, dass das Einspritzen somit für eine kurze Zeit einen hohen Anteil an Energie benötigt. Die Kurve verläuft nicht über einer konstanten Zeitänderung sondern über einer sich zeitlich ändernden Wegänderung. Die Daten der Dosierarbeit dagegen sind wegen der durch Umdrehungen abgegebenen Leistung des Dosiermotors über die Zeit aufgenommen. Diese Aufnahme gestaltet sich rechnerisch einfacher. Die Verfahren werden im letzten Teil der Arbeit

bewertet. Würden die Ergebnisse der Vorversuche sofort kritisch in diesem Kapitel betrachtet, ließe sich feststellen, dass für eine exakte Auswertung von Versuchsreihen die Aufnahme noch zu lückenhaft ist. Zwischen dem elektrischen Anteil und dem letztendlich hydraulischen Anteil, was sozusagen `unter dem Strich dabei herauskommt`, ist der Unterschied noch zu groß und die Aufnahme der Daten nicht exakt und genau genug.

#### 6.6.4 Versuchsreihe 4: Splittung des Antriebs zur Vervollständigung der Energiebilanz

Diese Versuchsreihen dienen der Erfahrungssammlung für die später folgenden finalen Versuchsreihen zum Vergleich von verschiedenen Einstellparametern. Werden die Komponenten etwas genauer betrachtet, wird klar, dass nicht alle Arten von Energieströmen berücksichtigt werden.

Berücksichtigt werden in den Vorversuchen bisher: Die elektrische Leistung (als Input), die Pumpenleistung an der Welle (Regel- und Haltepumpe) statisch möglich (Zwischen-Größe), die Hydraulische Leistung (in Form von Arbeit) als Output für die Prozessbilanz

Berücksichtigt werden nicht: Die Wärmeströme der Pumpen (Zwischen-Größe), die Leckölströme der Pumpen (Zwischen-Größe), die Konvektion der Pumpen in den Öltank (Zwischen-Größe)

Fotos in dem Diskussionsteil der Arbeit zeigen den Beweis der Existenz der zusätzlichen o.g. drei nicht berücksichtigten Komponenten: Leckölmenge, Wärmestrom, Konvektion

Werden alle drei Komponenten mit in die Rechnung einbezogen, kann für den Leerlauf eine konstante Leistungsaufnahme der Antriebskomponenten erfolgen.

<b>Messung Ölvolumen Leakage Pumpen</b>			
<b>Regelpumpe Messbecher in l</b>	<b>Zeit in s</b>	<b>Gewicht korrigiert</b>	<b>Temperatur Öl in °C</b>
1,2	188	1000,6	73
0,6	82	563	70
0,6	83	549	71
0,6	82	555,42	70
1,2	189	979	71
1,2	187	978,17	71
		<b>Mittelwert</b>	<b>71,00</b>
<b>Volumenstrom [l/min]</b>			<b>min</b>
0,383 l/min			3,13
0,439 l/min			1,37
0,434 l/min			1,38
0,439 l/min			1,37
0,381 l/min			3,15
<b>Leckölmenge</b>			
<b>0.415 Liter/min</b>			

Tabelle 14: Leckölstrom Leerlauf Regelpumpe<sup>18</sup>

<sup>18</sup> Die Masse des Öles wurde unter Einbezug der Masse des Messbechers korrigiert. Für die weiteren Berechnungen wird eine konstante Dichte von 0,855kg/l angenommen.



Haltepumpe	Messbecher in ml	Zeit in s	Gewicht korrigiert	Temperatur Öl in °C
	0,55	151,8	487	57,4
	0,59	146,4	492,25	57,3
	0,51	138,6	474,7	58,6
	0,55	152,4	476,3	57,5
			<b>Mittelwert</b>	<b>57,70</b>
<b>Volumenstrom [l/min]</b>				<b>min</b>
	0,217 l/min			<b>2,54</b>
	0,242 l/min			<b>2,44</b>
	0,221 l/min			<b>2,31</b>
	0,217 l/min			<b>2,54</b>
<b>Leckölmenge</b>				
<b>0,224 Liter/min</b>				

Tabelle 15: Leckölstrom Leerlauf, Haltepumpe

$$\dot{Q}_{Leck} = \dot{V} * \rho * c_p * (T_{Lecköl} - T_{Öltank}) \quad (6.5)$$

$$\dot{Q}_{Leck. Regelp.} = 0,855 * \frac{0,415l}{min} * \frac{2,05kJ}{kgK} * \frac{(71 - 45)K}{60 * 1000} = 0,315kW$$

$$\dot{Q}_{Leck. Haltep.} = 0,855 * \frac{0,224l}{min} * \frac{2,05kJ}{kgK} * \frac{(58 - 45)K}{60 * 1000} = 0,085kW$$

### Berechnung der Konvektion Pumpe in den Öltank

Berechnung Konvektion Pumpe				
<b>Reynoldszahl</b>		" $Re = \rho * u * l / \eta = u * l / \nu$ "	<b>2024</b>	<b><math>&lt; 5 * 10^5</math></b>
Berechnung kinematische Viskosität		" $\nu = \eta / \rho$ "	0,000099	$[N*s/m^2] / [kg/m^3]$
Berechnung Prandtzahl		" $Pr = c_p * \eta / k$ "	810,18	
<b>Berechnung Nußeltfunktion</b>		" $Nu_x = 0,664 * Re^{1/2} * Pr^{1/3}$ "	278,47	
Geschwindigkeit	0,5	50cm/s	Konvektion	0,4 40cm
<b>Berechnung <math>\alpha</math></b>	<b>117,65</b>	<b><math>[W/m^2 * K]</math></b>		

Tabelle 16: Konvektion Leerlauf, Pumpengehäuse

Die Konvektion wird berechnet nach folgender Formel mit  $\alpha$  aus o.g. Tabelle 16:

$$\dot{Q}_{Konv} = A * \alpha * (T_{Oberfl} - T_{Öltank}) \quad (6.6)$$

**Die Temperatur des Öls unter der Pumpe wurde mit 43°C gemessen!**

$$\dot{Q}_{Konv.} = 0,4m * 0,4m * 117,65 \frac{W}{m^2K} * \frac{(58-43)K}{1000} = 0,282kW$$

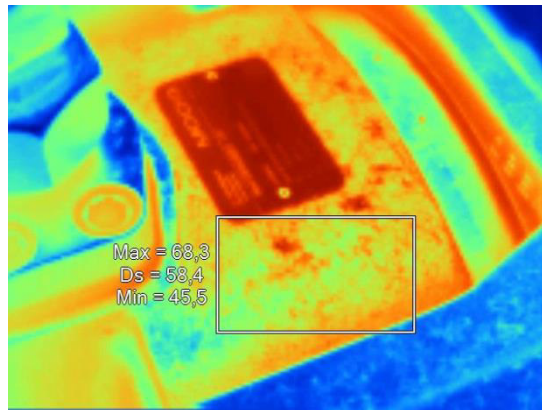


Abbildung 66: Infrarotbild Leerlauf, Pumpengehäuse

### Wärmeströme beider Hydraulikpumpen manuell berechnet

$$\dot{Q}_{Förd} = \dot{V} * \rho * c_p * (T_{Förd} - T_{Öltank}) \quad (6.7)$$

$$\dot{Q}_{Förd. \text{ Regelp}} = 0,855 * \frac{12,9l}{min} * \frac{2,05kJ}{kgK} * \frac{(47,4 - 45)K}{60 * 1000} = 0,90kW$$

$$\dot{Q}_{Förd. \text{ Haltep.}} = 0,855 * \frac{21,7l}{min} * \frac{2,05kJ}{kgK} * \frac{(46,4 - 45)K}{60 * 1000} = 0,89kW$$

Es ergibt sich die Aufstellung des Antriebes in den folgenden Tabellen 17 und 18. Die mittleren Leistungen für die Förderwärmemengen (Formel 43) sowie Leckölmengen von Regel- und Haltepumpe (Formel 41) und die Konvektionsgröße (Formel 42) kommen hinzu. Es werden die Leistungen aufsummiert und zu den bisherigen Ergebnissen der Förderleistung addiert. Nun deckt sich die Bilanz im Antrieb auf 82,7% (Tabelle 15). Zu der Antriebsleistung von 5,16kW werden 4,27kW durch die Antriebsbilanz spezifiziert. Die ASM hat laut Typenangabe einen Wirkungsgrad von 0,88<sup>19</sup>. Die 5% Differenz wird auf Messfehler und Ungenauigkeiten zurückzuführen sein. Die Tabelle 17 auf der folgenden Seite zeigt die Raumbilanz im Leerlauf mit den entsprechenden Wasserkühlleistungen und der Lüftungsleistung. Es können mit dieser Erkenntnis nun die weiteren Versuchsreihen erfolgen. Die Bilanz wird erfolgreich gedeckt. Die Veränderung von Parametern und deren Auswirkung auf die Bilanz sollte untersucht werden. Enthalten ist in der Antriebsleistung nicht die Strahlung, die der Motor durch seine Wärmeverluste an die Umgebung abgibt. Es werden auch nicht die Eisen- und Magnetisierungsverluste des Motors berücksichtigt. Der Wirkungsgrad von ca. 83% in Tabelle 18 lässt auf diese Verluste schließen.<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Im Kapitel „10.5 Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse“ S.178ff. wird die Rechnung des Wirkungsgrades vorgestellt!

<sup>20</sup> Im Anhang eine detaillierte **Übersicht der Leerlaufergebnisse** im Anhang unter 13.6, S.208

Aufsplittung Antrieb kW	Summe kW
<b>Mechanische Leistung Welle der Pumpen</b>	<b>1,800</b>
Regelpumpe	0,403466591
Haltepumpe	1,396108432
<b>Wärmeleistung der Pumpen</b>	<b>1,790</b>
Regelpumpe	0,890073
Haltepumpe	0,8994325
<b>Leckölströme der Pumpen</b>	<b>0,396</b>
Regelpumpe	0,313467534
Haltepumpe	0,082664689
<b>Konvektion Pumpe ins Öl</b>	<b>0,282</b>
Beide Pumpen	0,282
<b>Summe der Pumpen zum Antrieb</b>	<b>4,268</b>
<b>Wirkungsgrad ASM</b>	<b>82,7%</b>

Tabelle 17: Berechnung Antriebskomponenten im Leerlauf

Leerlaufmessung		
<b>Input</b>	<b>kW</b>	
Antriebsleistung	5,16	
Steuerung und Beleuchtung	0,48	
<b>Summe Input</b>	<b>5,64</b>	
<b>Output</b>	<b>kW</b>	
Kühlwasser Öl	2,68	<b>2,804</b>
Kühlwasser Form	0,22	
Luftleistung	1,36	
Wände Konvektion	1,00	
<b>Summe Output</b>	<b>5,27</b>	
<b>Deckung</b>	<b>93,3%</b>	

Tabelle 18: Bilanzierung des Antriebs zum Raum, Leerlauf

### 6.6.4 Zusammenfassung zu den Versuchen

Durch die erste Versuchsreihe lassen sich erfolgreich die Bilanzgrößen (mit Antrieb und Heizung) durch den Output (mit Raumluft sowie der Wasserkühlung) decken. Abweichungen von 3% sind vorhanden und können als Messfehler gesehen werden. Der zweite Versuch leitet die Raumgrößen für den Leerlauf ab und auch diese Bilanz wird erfolgreich gedeckt. Die beiden letzten Versuche beschreiben die Antriebsbilanz der Prozessschritte Einspritzen und Plastifizieren. Während im ersten Versuch die Bilanzen einige Lücken aufweisen und nur die Förderströme in den Druckleitungen von Regel- und Haltepumpe berücksichtigt werden, können im zweiten Versuch durch weitere Untersuchungen die Bilanzlücken 1. durch Wärmeströme in den Druckleitungen, 2. durch Leckölströme und 3. durch die Konvektion der Pumpe in den Öltank geschlossen werden. Dieses Erkenntnis bietet eine Vorlage für ein automatisiertes Messverfahren.

## 7. Modellbildung (aus den o.g. vorgestellten Versuchsthemen)

Im folgenden Kapitel 7 der „Modellbildung“ wird auf ein mögliches Automatisierungsverfahren der Bilanzaufnahme eingegangen. Folgende Tabellen 19 und 20 enthalten die möglichen Versuchsreihen für eine automatisierte Effizienzmessung, welche die Firma Pöppelmann interessiert und die der Wissenschaft weitere Erkenntnisse bringen können, denn die Ergebnisse sind bisher zu dieser Thematik noch nicht niedergeschrieben worden.

### 7.1. Vorbereitung Prozessmodelle: Matrix über vorliegende Energieprozesse und deren Prozessparameter

Prozesse Matrix	Ausgangszustand	Veränderung 2	Veränderung 3	Veränderung 4
Antriebsöl	Shell Tellus S2	Shell Tellus S2	Shell Tellus S2	Shell Tellus S2
Heizung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung
Heiztemperatur °C	215	225	215	215
Öltemperatur °C	45	45	50	55
Material	PPH9020	PPH9020	PPH9021	PPH9022
Einspritzen	1s	1s	1,05s	1,05s
Plastifizieren	2s	2s	2,1s	2,1s
Kühlzeit	25,3s	25,3s	25,3s	25,3s
Schliesskraft	110bar	110bar	110bar	110bar
Prozesse Matrix	Veränderung 5	Materialtausch 6	Materialtausch 7	Materialtausch 8
Antriebsöl	Shell Tellus S2	Shell Tellus S2	Shell Tellus S2	Shell Tellus S2
Heizung	mit Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung
Heiztemperatur °C	215	215	190	225
Öltemperatur °C	45	45	45	45
Material	PPH9020	PE1800H	PE1800H	PE1800H
Einspritzen	1s	1,05s	1,05s	1,05s
Plastifizieren	2s	2,1s	2,1s	2,1s
Kühlzeit	25,3s	25,3s	25,3s	25,3s
Schliesskraft	110bar	110bar	110bar	110bar

Tabelle 19: Modellbildung, Prozessänderung vom Grundzustand

Die Maschinenprozesse werden in Quantität und Qualität durch Ihre Parameter, wie auch schon im Grundlagen-Teil unter Kapitel 3 angedeutet bestimmt. Um Versuchsreihen miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig einen Ausgangszustand zu definieren. Dieser Ausgangszustand ist der Zustand bei Inbetriebnahme der Maschine nach der Einrichtung des Werkzeuges und ersten erfolgreichen Produktion der neuen Teile (der Zustand, ab dem erstmals Teile aus der Maschine in ihrer vollen Form eingespritzt werden). Der Prozess findet mit einer bestimmten Heizungstemperatur, einer bestimmten Öltemperatur und definierten Geschwindigkeiten V-Einspritzen und V-Plastifizieren statt. Kühlzeit und Schließkraft sollen in den ersten Versuchen wie auch die Geschwindigkeiten konstant gehalten werden. Anschließend erfolgen Erhöhungen der Heizungstemperatur. Das Material wird nicht verändert. Es wird eine Veränderung im Energieverbrauch und in der Energieabgabe an die Umgebung vermutet. Im Versuchsteil wird genauer untersucht, ob

die Vermutung stimmt. Der oben genannte Ausgangszustand wird anschließend mit einem anderen Material dem PE1800H verglichen. Es erfolgt wieder eine anschließende schrittweise Temperaturveränderung der Heizung auf 190°C und 225°C. Alle anderen Parameter wie Öltemperatur und Kühlzeit sowie Schließkraft werden zu dem Ausgangszustand nicht verändert. Für die Einstellung des neuen Dosiervolumens werden neue Parameter für die Einspritzzeit und die Dosierzeit erwartet. Es wird vorweg angenommen, dass diese um das 1,5-fache größer sein werden. Dieses ist dem Datenblatt durch eine kleinere Dichte zu entnehmen. Die Einstellung wird von einem Kunststoff-Formgeber aus Erfahrungswerten durchgeführt. Die exakten Werte werden in den Versuchsreihen ermittelt.

## 7.2. Selektion und Auswahl der Prozessparameter:

### Verfremdungsmöglichkeiten für effizienzsteigernde Maßnahmen

Prozesse Matrix	Öltausch 9	Öltausch 10	Öltausch 11	Öltausch 12
Antriebsöl	Shell Tellus S4	Shell Tellus S4	Shell Tellus S4	Shell Tellus S4
Heizung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung
Heiztemperatur °C	215	225	215	215
Öltemperatur °C	45	45	50	55
Material	PPH9020	PPH9020	PPH9020	PPH9020
Einspritzen	1s	1s	1s	1s
Plastifizieren	2s	2s	2s	2s
Kühlzeit	25,3s	25,3s	25,3s	25,3s
Schliesskraft	110bar	110bar	110bar	110bar
Prozesse Matrix	Öltausch 13	Öltausch 14	Öltausch 15	Öltausch 16
Antriebsöl	Mobil DTE10	Mobil DTE10	Mobil DTE10	Mobil DTE10
Heizung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung	ohne Isolierung
Heiztemperatur °C	215	225	215	215
Öltemperatur °C	45	45	50	55
Material	PPH9020	PPH9020	PPH9020	PPH9020
Einspritzen	1s	1s	1s	1s
Plastifizieren	2s	2s	2s	2s
Kühlzeit	25,3s	25,3s	25,3s	25,3s
Schliesskraft	110bar	110bar	110bar	110bar

Tabelle 20: Modellbildung, Prozessänderung für Erwartung Effizienzverbesserung

Oben genannte Prozessparameter zeigen die Änderung für eine mögliche Energieeinsparung. Die Theorie wurde schon im Grundlagenteil behandelt. In der ersten Matrix wird die Öltemperatur im Tank durch Verändern des Wasserdurchflusses der Ölkühlung schrittweise erhöht. Wünschenswert sind Versuchsreihen mit 50 und 55°C Öltemperatur. Die anderen Parameter bleiben wieder konstant wie im Ausgangszustand. Das Material PE wird allerdings in der Maschine für die Versuchsreihen belassen. Erwartet werden Änderungen im elektrischen Energieverbrauch durch Veränderung der Viskosität des Öles durch die andere Öltemperatur. Inwiefern sich die Umgebungstemperatur dadurch ändert, muss in den Versuchsreihen geprüft werden. Die Wärmeströme der beiden Pumpen

werden sich durch die veränderte Tanktemperatur ebenso auf einem anderen Niveau bewegen. Die Eingangstemperatur steigt um 5°C je Versuchsreihe. Die Ausgangstemperatur wird gemessen und der dadurch zustande kommende Wärmestrom aufgenommen. Diese Änderung bedarf einer genauen rechnerischen Auswertung. Diese wird im folgenden Teil der Arbeit als Problemstellung angegangen und gelöst.

Die oben aufgeführte Tabelle 20 zeigt mögliche Veränderungen im Bereich der Ausstattung der Maschine. Zum einen durch andere Heizungsisolierung und zum anderen mit einer anderen Hydraulikflüssigkeit. Bei der Veränderung der Isolierung sind Ersparnisse im Bereich der elektrischen Heizleistung zu erwarten. Dieses wird sich in irgendeiner Form in der Umgebungstemperatur widerspiegeln. Der Tausch des Öles wird sich auf dem gesamten Produktionsprozess auswirken. Die veränderte Viskosität des Öles wird auf die Schmierung Auswirkungen haben. Laut den Angaben des Herstellers kann Energie eingespart werden. Dieses gilt es in den Versuchsreihen zu untermauern. Die Öltemperatur soll auch bei diesem Öl einer Veränderung unterliegen. Es gilt die Energiewerte zu beobachten und Änderungen in die Auswertung mitaufzunehmen. Unter Umständen sind ähnliche Werte wie bei dem Öl des Ausgangszustandes zu erwarten. Diese könnten sich aber auch auf einem anderen Niveau bewegen. Die Zeiten für den Einspritz- und den Plastifizierungsvorgang werden nicht verändert. Die Vergleichbarkeit zu dem Ausgangszustand wird damit hergestellt. Die Heiztemperatur sowie Kühlzeit und Schließdruck (bei Arburg = Schließkraft) bleiben ebenso konstant.

Die für diesen Themenbereich letzten Versuche finden noch einmal mit einem anderen Öl statt. Dieses soll ebenso energieeinsparende Effekte aufweisen, ist aber nicht wie das vorherige synthetisch hergestellt sondern ebenso wie das Öl in der Ausgangssituation mineralisch. Die Öltemperaturen werden wieder verändert und die Auswirkungen auf Raum und Prozess gilt es zu beobachten und zu untersuchen. Gegenüber den synthetischen energieeinsparenden Ölen zeigen die mineralischen energieeinsparenden Öle Veränderung in ihrer Zusammensetzung und der Viskosität. Die Leckölströme sowie die Wärmeströme in den Druckleitungen können für eine Veränderung der Energiebilanz des Raumes und des Antriebes sorgen. Dieses gilt es zu untersuchen. Das Material wird in diesen Versuchsreihen nicht weiter verändert. Die Ausgangswerte des Einspritzens und Plastifizierens können so mit den neuen Ergebnissen verglichen werden.

Die Aufnahme der Prozessdaten muss für alle Energiegrößen parallel erfolgen. Aus diesem Grund ist es erforderlich ein Auswertesystem in vollautomatischer Vorgehensweise einzuführen. Die Leistungsdaten müssen zum einen ermittelt und dann kumuliert werden.

### 7.3. Einführung der Analysemethodik für energietechnische Prozessmodelle

Folgende Tabellen zeigen die beiden Auswertungsverfahren der manuellen Erfassung und der automatisierten Erfassung im Vergleich. Anschließend werden beide Verfahren gegenübergestellt.

#### 7.3.1. Lösungsmodelle zur Erfassung von Energieströme

<b>Lösung 1 Manuelle Erfassung</b>		
<b>Nr.</b>	<b>Prozessschritte</b>	<b>Bemerkung</b>
1	Programmierung der Umwandlung Variablen	*Eingabe mittels strukturiertem Text
2	Analyse erfolgt mittels SPS Software (Temperaturen) und manuelles Ablesen (Stromzähler)	*Mischung aus automatisch, manuell
3	Ergebnisse werden in File eingetragen und sind zur Auswertung gleich aufbereitet	*in Excel File manuell eingetragen
<b>Analysevorgang</b>		
<p>*Die Analyse erfolgt durch das Messen der Daten der Sensoren an der Maschine und dem anschließenden Umwandeln der globalen Variablen</p> <p>*Variablen in eine Real-Zahl (Sensoren Einlesen). Die Daten werden während des Produktionszyklus manuell in eine Excel Tabelle eingetragen.</p> <p>Temperaturen und Wasserdrücke am Anfang, in der Mitte und am Ende des Zyklus</p> <p>Am Anfang des Zyklus wird der Stromverbrauch aufgenommen und am Ende.</p> <p>Die Differenz ergibt den verbrauchten Wert in kWh. Die Wassermenge wird ebenso am Anfang des Zyklus an der Wasseruhr abgelesen und am Ende.</p> <p>Die Differenz ergibt mit der Temperaturdifferenz den Wärmestrom.</p>		

Tabelle 21: Parametermessung, manuelle Lösung 1

<b>Lösung 2 automatisiert</b>		
<b>Nr.</b>	<b>Prozessschritte</b>	<b>Bemerkung</b>
1	Programmierung Umwandlungsbausteine der Variablen	*Eingabe mittels strukturiertem Text
2	Analyse erfolgt mittels SPS Software und werden in CSV File direkt gespeichert	*automatisiert
<b>Analysevorgang</b>		
<p>*Nach dem Signal "Schließen" wird der Startpunkt an die Steuerung übertragen und die Messaufnahme beginnt. Er werden zugleich die Globalen Variablen (Temperatur, Druck und Durchflüsse) eingelesen und aus den Daten werden die Leistungen berechnet.</p> <p>*Die Leistungen werden über den Zeitverlauf des Produktionsprozesses kumuliert und mit dem folgenden Signal "Schließen" wird die Kumulation abgeschlossen und der Energiewert wird berechnet und in die Bilanzrechnung eingetragen. Die Daten können anschließend in eine CSV-Datei zur weiteren Bearbeitung in Excel abgespeichert werden.</p> <p>*Je Zyklus können bis zu 10ms Daten aufgenommen werden.</p>		

Tabelle 22: Parametermessung, automatisierte Lösung 2

### 7.3.2. Erstellung eines Pflichtenheftes für die Analysemethodik

Es ist eine Softwareanwendung zu erstellen, welche die Energiestromdaten ausliest und durch Umrechnung in ein Bilanzmodell verarbeitet und gegenüberstellt. Die Daten sollen sich in einem Excel-File auslesen lassen, um damit weitere Berechnungen durchführen zu können. Die Abgrenzung von Zyklus zu Zyklus soll automatisch erfolgen. Der vorhergehende Zyklus wird nach Ende abgelegt, während der aktuelle Zyklus gerade aufgenommen wird.

#### Aufgabenstellung/Konstruktion der Software

Aufgabenstellung ist es die von Beckhoff eingeführte Software TWIN-Cat zu verwenden. Die bestehende Hardware (Messklemmen und Sensoren zu den Messklemmen) soll mit dieser Software angesteuert und Daten abgerufen werden. Die Globalen Variablen, welche die Daten der einzelnen physikalischen Größen (Temperatur, Druck und Geschwindigkeit) beinhalten, sind mit einem Rechenprogramm zu verbinden um anschließend die Energiegrößen als Output anzuzeigen und auswerten zu können. Die Energieströme sind in einem Diagramm zur Nachverfolgung mit der Software SCOPE VIEW prüfbar.

#### Beckhoff SCOPE VIEW, Produktionsprozess elektrische Leistung

Die Anwendung Scope View dient zur Darstellung der Variablen als graphische anschauliche Darstellung und zur Bereichsmarkierung der von den Größen umschlossenen Flächen (Prozessschritte).

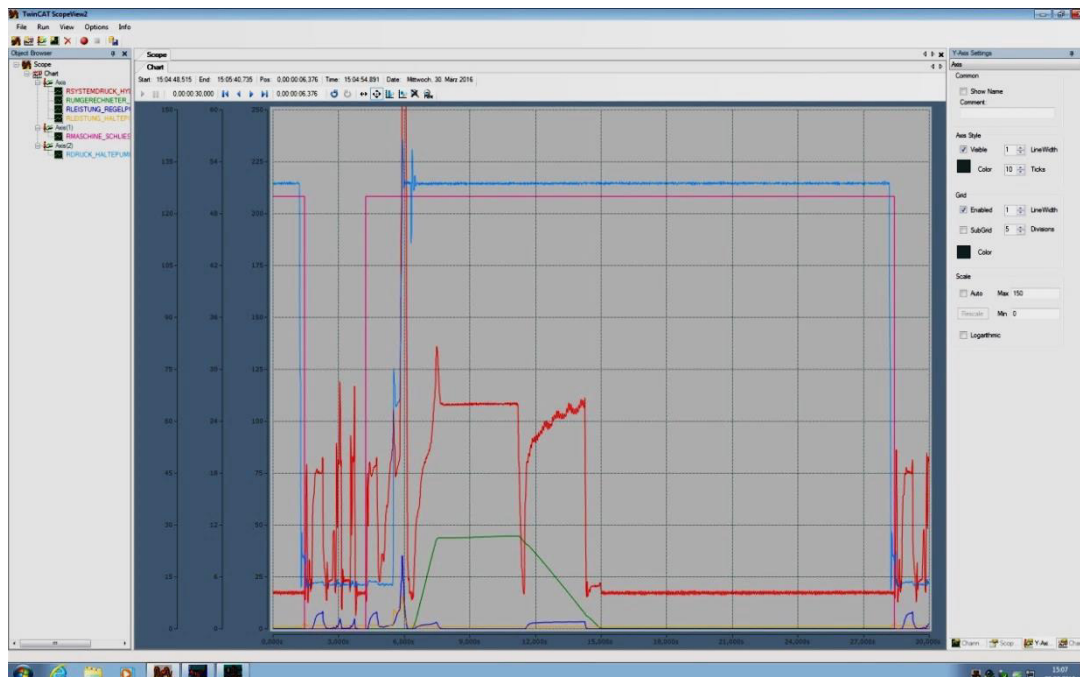


Abbildung 67: Scope Ansicht, Spritzgießprozess



Die Variablen werden ausgewählt und durch verschiedene Skalierung im Graph dargestellt. Die Anwendung erlaubt das Setzen eines Cursors und die zeitliche Messung eines Cursorbereiches. Es können somit Prozessabschnitte zeitlich gemessen und quantitativ bewertet werden.

### Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Bilanzrechnung

Die aus den Grundlagen dargestellten Formeln der Energieströme<sup>21</sup> werden in einer Programmiersprache „strukturierter Text“ in sog. Funktionsbausteinen, Funktionsblöcken oder kleineren Programmen eingegeben. Bezug genommen wird dabei auf die Variablen der Ein- und Ausgänge, welche in dem Baustein „Sensoren Einlesen“ von einem Integer- in eine Real-Zahl zur Anzeige eines realen Werten in der Maske umgerechnet werden.

Der Baustein „Bilanzrechnung Arbeit“ beinhaltet die für die Visualisierungen 01 bis 04 (S.112 bis S.115) erforderliche Leistungs- und Arbeitsberechnungen in kW und kWh. Die Berechnungen, die in den jeweiligen Funktionsblöcken für die Inputvariablen erfolgen und daraus die Output-Variablen berechnen, werden selbst als lokale Variable (d.h. Baustein als lokale Variable) gesetzt. Die Blöcke, welche dann einen Namen erhalten, werden mit den jeweils speziellen Variablen für die jeweilige Rechnung versehen (siehe Abbildung oben). Dieses erlaubt die Verwendung eines Funktionsblocks (der einmalig programmiert ist) für mehrere Berechnungen.

Beispiel:

- el. Einspritzarbeit: kum\_Leistungsmessung
- el. Plastifizierarbeit: kum\_Leistungsmessung



Abbildung 68: Zuordnung Funktionsblock zu lokaler Variable

<sup>21</sup> Siehe Übersicht, Abb. 27, S.57 in der Istaufnahme

**Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Stromzähler für SIEMENS PAC Messgerät**

Der Funktionsblock „FB\_Stromzähler“ dient der Auswertung von Impulsen des Strommessgerätes „Siemens PAC“. Das Gerät wird zu Testzwecken so eingestellt, dass alle fünf Wattstunden ein Impuls von dem Gerät ausgegeben wird. Wird ein Impuls ausgegeben, gelangt dieser über eine digitale Eingangsklemme in das Gerät. Die Impulse werden mit einer Impulswertigkeit hochgezählt. Nebenbei wird die Zykluszeit aufsummiert. Erfolgt ein Impuls, wird die Zeit in eine Variable geschrieben. Die vorherige Variable wird wieder zu 0 gesetzt. Die Leistung ergibt sich anschließend aus der Berechnung der Variablen der vergangenen Zeit mal der Pulswertigkeit. Die Leistung wird dementsprechend auf die Einheit Stunden und in Kilowatt umgerechnet. Erfolgt länger als eine bestimmte Zeitspanne kein Impuls, wird durch eine Abfrage der Leistungswert zu Null gesetzt (falls die Stromquelle ausgeschaltet oder im Ruhemodus ist).

Dieses Verfahren wird für die Berechnung der aktuellen Heizleistung eingesetzt. Für die Messung der Antriebsleistung steht ebenfalls ein PAC-Messgerät zur Verfügung.

Alternative: Dem Messstand wird ein ZES-Leistungsmessgerät LMG450 zur Verfügung gestellt. Dieses erlaubt nach bestimmter Einstellung am Messgerät selbst das Ausgeben von Spannungssignalen. Diese werden auf eine Spannungsklemme (0-10V) gegeben und einer Variablen zugeordnet. Die Ausgabe erfolgt somit als analoges Signal und könnte wohlmöglich genauere Ergebnisse liefern. Dies gilt es zu untersuchen.

**Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Wärmemengenzähler hochauflösend**

Die Berechnung mit dem Wärmemengenzähler verläuft ähnlich dem Stromzähler. Die digitalen Impulse werden von einer Wasseruhr entnommen. Die Wasseruhr liefert alle 10 Liter einen Volumenimpuls. Die Taktzeit wird wiederum wie auch beim Stromzähler aufsummiert und bei jedem Impuls in eine Variable geschrieben. Anschließend wird der Volumenstrom mit der Pulswertigkeit der jeweiligen Literimpulsausgabe der Wasseruhr verrechnet. Für die Berechnung des Wärmestromes fließen die variablen Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur (jeweils auf den Öl-Kühlkreislauf oder den Formkreislauf bezogen) ein.

Der Funktionsblock wird verwendet sowohl bei der Leistungsermittlung der Form- als auch bei der Ölkühlung.

Erste Alternative: In den Öl-Kühlkreislauf und den Form-Kühlkreislauf werden „Sick-Durchflusssensoren“ eingebaut. Diese liefern der SPS ein Spannungssignal. Dieses kann wiederum

von einer Spannungsklemme (0-10V) eingelesen werden. Das Ergebnis erscheint zu jeder ms aktuell als Variable in der Rechnung.

Zweite Alternative: In den Kreislauf wird ein Federsensor eingebaut. Je nach Durchflussmenge wird die Feder dementsprechend zusammengedrückt. Der Sensor liefert ein 4 bis 20mA Stromsignal und wird mit einer Stromklemme (4-20mA) im Beckhoff Messsystem eingelesen. Die Umrechnung in eine REAL-Zahl erfolgt entweder durch eine spezielle Messklemme oder einen Umrechnungsbaustein (bei der Doktorprüfung: Anhang-CD/SPS\_Programm\_PLC\_Control/Sensoren\_Einlesen).

### **Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, kumulierte Leistungsmessung**

Der Funktionsblock „kumulierte Leistungsmessung“ stellt eine der wichtigsten Rechenprogramme dar. Die Leistungswerte aus den jeweiligen Variablen werden auf einem bestimmten Zeitintervall mit Angabe eines Anfangs- und Endpunktes aufsummiert. Der Start wird mittels boolscher Variablen ausgeführt. Die Kumulation erfolgt in 10ms Unterteilungen (dieses entspricht der Zykluszeit von 10ms). Die Kumulation endet mit der Eingabe einer boolschen Variablen für den Endpunkt. Die Aufnahme dieses digitalen Signals erfolgt durch eine digitale Eingangsklemme. Wird die Kumulation aktiviert, werden die Leistungswerte addiert und nach dem Stop-Signal in eine Variable als kumulierter Wert geschrieben. Dieses entspricht dem Arbeitswert in Kilowatt mal Millisekunden.

Mittelwert: Wird ein gemittelter Leistungswert zwischen den beiden Punkten Start und Ende gesucht, wird durch die abgelaufene Zeit in ms geteilt. Dieses Verfahren wird auf die Leistungsbilanz-Visualisierung Nr. 3 angewendet. Die Kumulation berücksichtigt alle eintretenden Spitzenwerte, die während eines Spritzgusszyklus eintreten. Die Länge des jeweiligen Eintretens wird über ihre Wertigkeit in der Berechnung entscheiden.

### Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Arbeit in kWh)

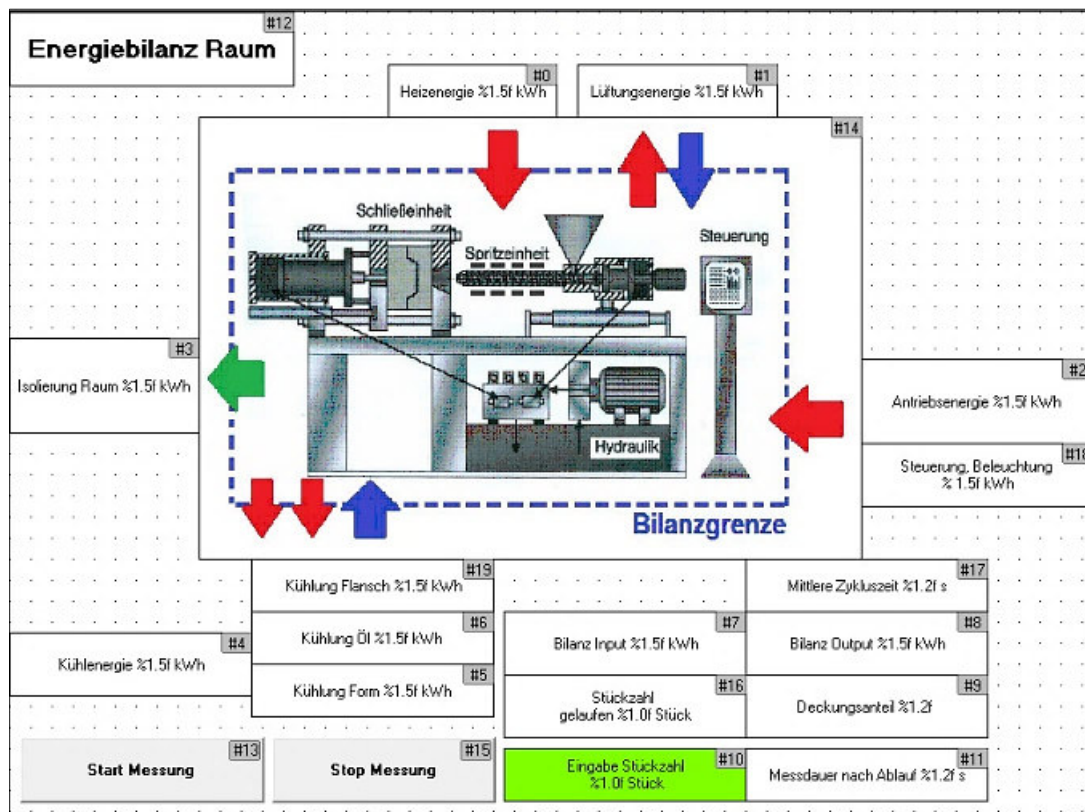


Abbildung 69: PLC Ansicht Raumbilanz (Arbeitswerte)

Die aufgenommenen Energiegrößen in Form von Arbeit in kWh werden je nach Energieform der jeweiligen Bilanzseite Input oder Output zugeordnet und summiert. Die Anzeige erfolgt nach dem Anschluss einen Produktionszyklus. Die Trennung zwischen den Produktionszyklen erfolgt nach dem Signal „Schließen“. In der Visualisierung enthalten sind die Größen:

Input:

- Elektrische Arbeit der Antriebsmaschine,
- Elektrische Heizungsarbeit
- Elektrische Arbeit für Steuerung und Beleuchtung (konstant)

Output:

- Kühlwasserarbeit für Ölkühlung (daraus abgeleitet Flanschkuhlung) sowie
- Formkühlungsarbeit
- Lüftungsarbeit und die Arbeit der
- Wärmeübergänge (Raumisolierung)

Deckungsanteil von Output zu Input. Der Wert gibt die von den Sensoren aufgenommene Energie an, welche durch die elektrische Arbeit (Heizung, Maschine, Beleuchtung) in die Bilanz eingeführt wird.

### Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Leistung in kW)

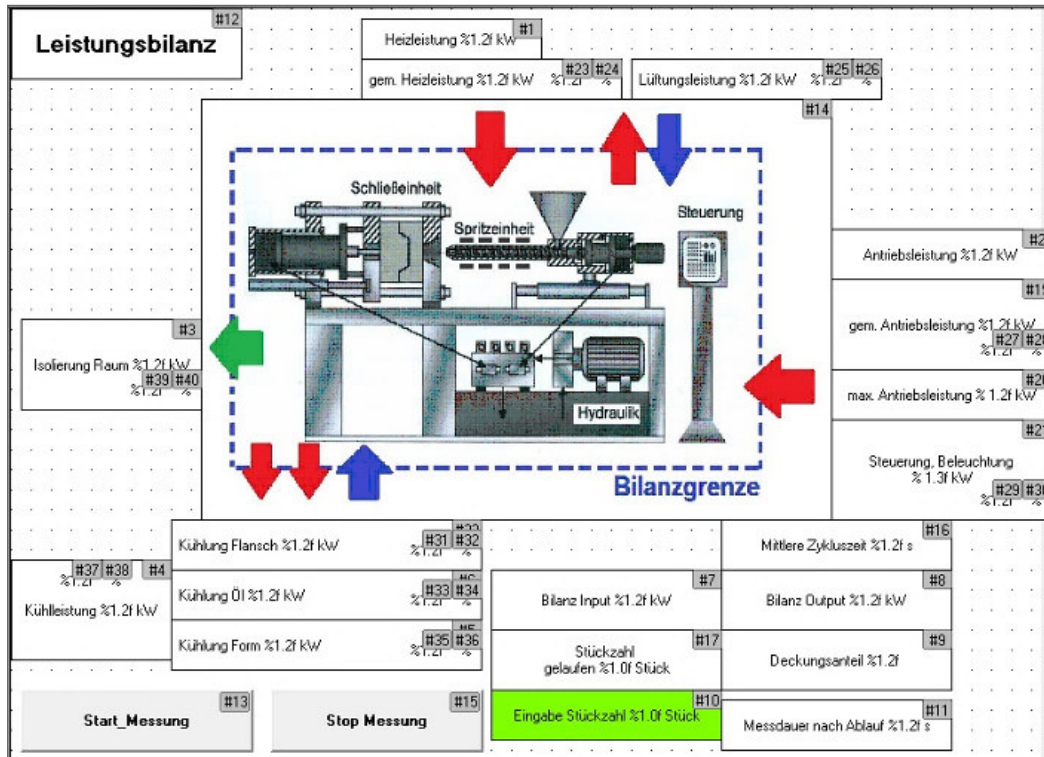


Abbildung 70: PLC Ansicht Raumbilanz (Leistungswerte)

Die aufgenommenen Energiegrößen in Form von Leistung in kW werden wie auch in der Energiebilanz je nach Eintreten im Eingangs oder Ausgangsstrom der jeweiligen Bilanzseite Input oder Output zugeordnet und wieder addiert. Die Anzeige ist der über die Zykluszeit gemittelte Leistungswert, dessen Berechnung erfolgt nach dem Abschluss eines Produktionszyklus. Sie erfolgt durch den Kumulationsbaustein parallel zu den Produktionszyklen und startet wie schon beschrieben mit dem Signal „Schließen“. In der Visualisierung aufgeführt sind die Größen:

Input:

- mittlere elektrische Leistung Maschine,
- Heizungsleistung
- Steuerung und Beleuchtung (konstant)

Output:

- Kühlwasserarbeit für Ölkühlung (daraus abgeleitet Flanschkuhlung) sowie
- Formkuhlung,

- Lüftungsarbeit und die Arbeit der
- Wärmeübergänge (Raumisolierung)

### Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Einspritzen in kW/s)

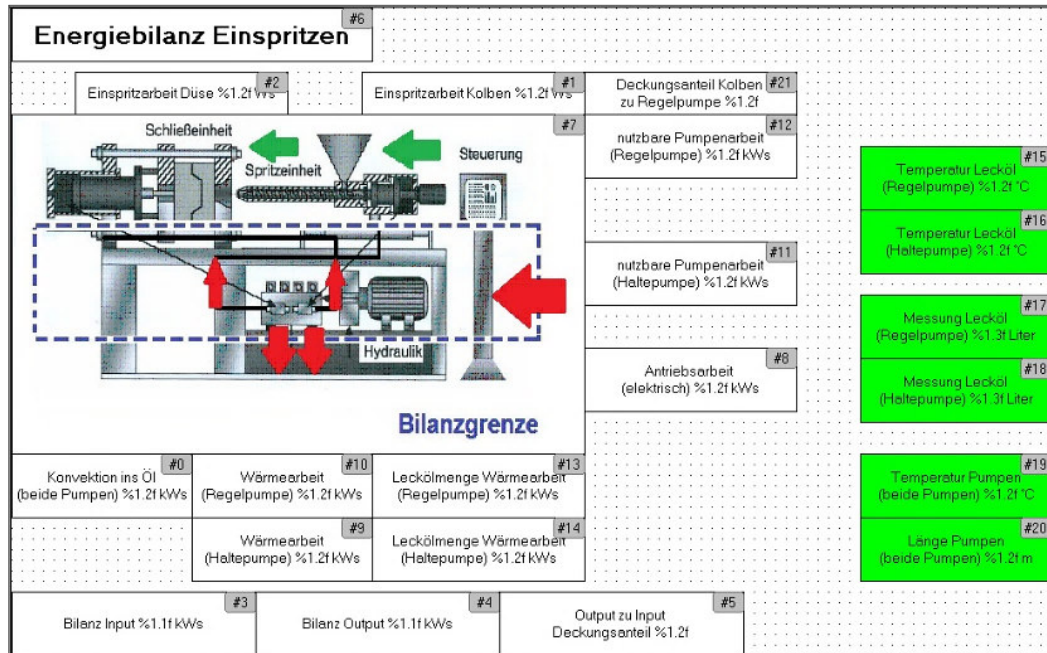


Abbildung 71: PLC Ansicht Prozessbilanz (Einspritzen)

Die Maske für die Einspritzarbeit enthält neben den Ausgabefeldern für die hydraulische und spezifische Einspritzarbeit die für eine Ableitung der Energieformen nach dem Antrieb notwendigen Zwischengrößen. Die Einspritzarbeit der Regelpumpe und der Haltepumpe können bestimmt werden durch die Eingabe von Parametern für den Leckölstrom. Diese fließen in die Berechnung der Wärmeleistung der Leckölarbeit für Regel- und Haltepumpe mit ein. Die Wärmeleistung in der Druckleitung wird durch die von den Eingangsklemmen gemessenen Temperaturen und dem Durchfluss (durch das Hydrotechnik Turbinenmessgerät) gemessen und berechnet. Die abgenommene Leistung der Pumpe an der Welle wird ebenso durch die Volumenstrommessung und Druckmessung mittels hinterlegter Formel berechnet. Die Kumulation erfolgt hier automatisch je Zyklus für nur eine sehr kurze Zeit (der o.g. Einspritzdauer). Sie erfolgt hier nicht über der Zeit sondern über den zurückgelegten Weg, welcher durch den Weggeber am Einspritzkolben durch eine Spannung abgefragt wird. Dieses Signal wird auf eine Spannungseingangsklemme (0 bis 10V) gegeben. Die Weggeber sind direkt mit der Steuerung der Maschine sowie mit dem SPS-Messsystem verbunden. Um die Werte in der Maschinensteuerung nicht wegen parallel geschalteter SPS-Klemme



zu verfälschen (Innenwiderstand der Klemme) wird das Signal über einen Trennverstärker mit hohem Eingangswiderstand gegeben.<sup>22</sup>

### Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Visualisierung Bilanz (Plastifizieren in kW/s)

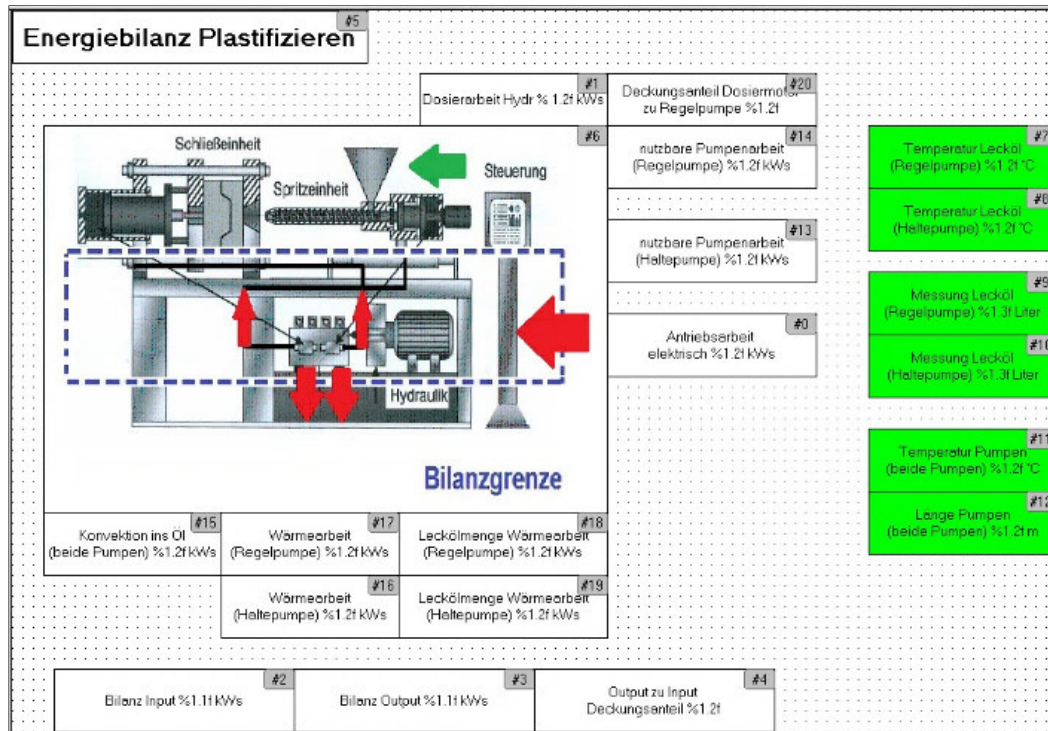


Abbildung 72: PLC Ansicht Prozessbilanz (Plastifizieren)

Die Maske für die Plastifizierarbeit enthält wie die Einspritzarbeits-VISU Ausgabefelder für die eigentlich umgewandelte Energie am Ende der Bilanz, der Plastifizierarbeit am Dosiermotor. Für eine Ableitung der Energieformen der nach dem Antrieb notwendigen Zwischengrößen werden wieder Zwischenberechnungen im Hintergrund durch o.g. Formeln durchgeführt. Die Plastifizierarbeit der Regelpumpe und der Haltepumpe können auch hier berechnet werden durch die Eingabe von Parametern für die Leckölströme. Auch hier ist die Wärmeleistung in der Druckleitung durch die von den Eingangsklemmen gemessenen Temperaturen und dem Volumenstrom (durch das Hydrotechnik Turbinenmessgerät) gemessen und berechnet. Die abgenommene Leistung der Pumpe an der Welle wird ebenso durch die Volumenstrom- und Druckmessung mittels hinterlegter Formel berechnet.

Die Kumulation erfolgt wie im oberen Beispiel hier automatisch je Zyklus für die Dosierzeit. Die Berechnung wird hier über das Drehmoment des Dosiermotors durchgeführt. Die Leistung beinhaltet die Größe Drehzahl pro Minute. Diese wird über das Zahnrad des Dosiermotors mittels Impulsgeber

<sup>22</sup> Die Wegermittlung wurde ausführlich zur Doktorprüfung in einer Excel-Tabelle abgegeben und erklärt. Sie stellte Informationen über Kalibrierung des Weggebers zur Verfügung.

und Frequenzteiler zum Zählen und Teilen der Impulse auf die SPS-Steuerung gegeben. Dieses Signal wird hier ebenso auf eine Spannungseingangsklemme (0 bis 10V) gegeben.

## Beckhoff TWIN-CAT, Anwendung PLC Control, Temperatur-/Druckübersicht

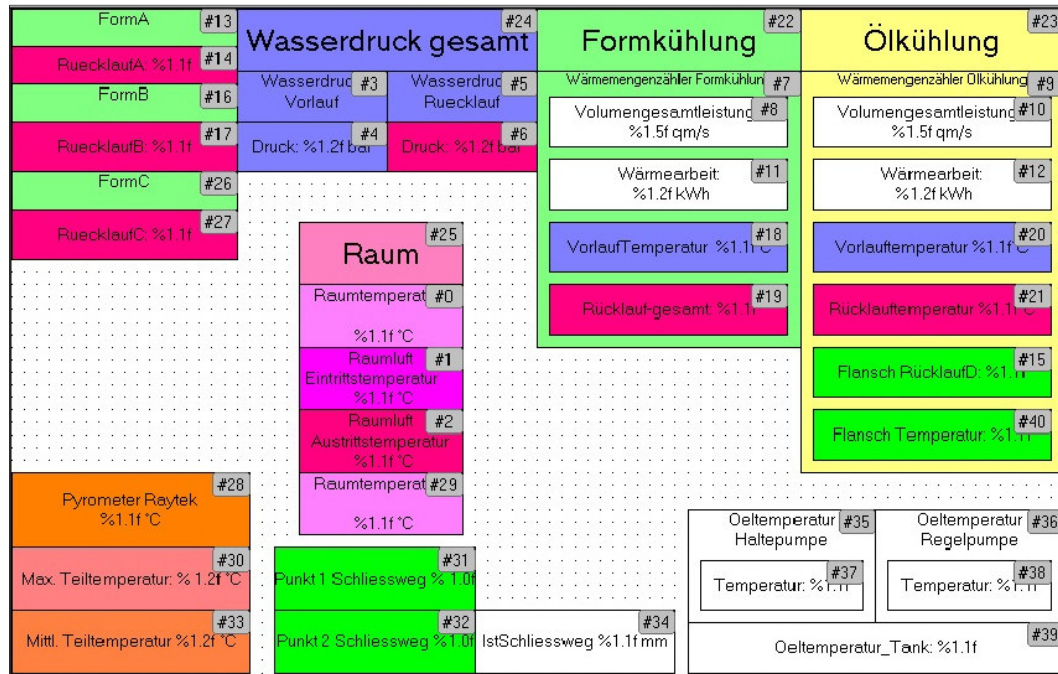


Abbildung 73: PLC Ansicht Parameterübersicht (Temperaturen Druck)

Die Visualisierung der Temperaturen und Druckdaten dient der externen Erfassung der Parameter an sich. Diese Visualisierung ist eine Auflistung der globalen Variablen in anderer Reihenfolge (dem Energiesektor) angeordnet. Enthalten sind die Temperaturen für den Vor- und Rücklauf der Kühlung für Öl und Form. Es werden ebenso die Druckdaten für die Vor- und Rückläufe angezeigt. Die Formkühlung wird separat für spezielle Durchflussmessungen in einzelne Kühlkanäle aufgeteilt. Die Daten für die einzelnen Kühlkanäle stammen aus den SICK Messgeräten. Die Daten für den gesamten Durchfluss stammen aus dem Durchflussmesser (Wasseruhr mit Impulsgeber alle 10l). Die Summe der Durchflüsse der einzelnen Kanäle für die Form entspricht im Idealfall dem Durchfluss des Durchflussmessers der Formkühlung. Zusätzlich werden in dieser Visualisierung die Temperaturen für die Wärmemengenummessung in den Druckleitungen der beiden Hydraulikpumpen angezeigt sowie die Temperatur des Öls im Tank. Es lässt sich somit die Temperaturdifferenz kontrollieren und es lassen sich Unterschiede im Temperaturverlauf sehr leicht feststellen. Für die Öl- und Formkühlung wird die benötigte Wärmearbeit in kWh oben in der Ecke angezeigt. Diese wird zusammen mit dem Durchfluss in  $\text{m}^3/\text{s}$  ausgegeben. Die Temperaturen im Werkzeug werden mittels Infrarotsensor auf die Steuerung gegeben. Gemessen wird die Temperatur in der heißesten Kavität des Werkzeugs beim Öffnen der Teile. Somit kann bei dem Signal „Werkzeug öffnen“ die Temperatur des Teils ermittelt werden. Mit einem Maximum Baustein kann die Temperaturspitze herausgerechnet werden.



## Beckhoff TWIN-CAT, Kalibrierungsübersicht, Einstellungen der Sensoren

Wasserdruck Vc #0	Wasserdruck_Ruec #5	Raumfühler1 #11	Raumfühler2 #20	Raumluft T_Ein #12	Raumluft T_Aus #13
Offset: %1.2f #1	Offset: %1.2f #6	Offset: %1.2f #14	Offset: %1.2f #21	Offset: %1.2f #16	Offset: %1.2f #18
Druck: %1.2f bar #2	Druck: %1.2f bar #7	Temperatur: %1.1f #15	Temperatur: %1.1f #22	Temperatur: %1.1f #17	Temperatur: %1.1f #19
MBA: %1.2f #3	MBA: %1.2f #8				
MBE: %1.2f #4	MBE: %1.2f #9				

Oeltemperatur Haltepumpe #23	Oeltemperatur Regelpumpe #24
Offset: %1.2f #25	Offset: %1.2f #27
Temperatur: %1.1f #26	Temperatur: %1.1f #28
Offset: %1.2f #30	
Oeltemperatur_Tank: %1.1f #29	

#10 Zurück

Abbildung 74: PLC Ansicht Kalibrierwerte (Einstellungsseite)

Die Einstellungsseite VISU Einstellungen ermöglicht die Anpassung der Temperatursensoren auf einen gemeinsamen Ausgangswert. Die Variablen in den Feldern beziehen sich auf den Offset der jeweiligen Bausteine und Funktionsblöcke. Die Raumfühler und die Temperatursensoren haben durch die langen Leitungen unterschiedliche Ausgangswerte. Es wird ein gemeinsamer Wert mit einem Referenzthermometer gemessen und die Temperaturen werden in der Steuerung dementsprechend abgeglichen. Ebenso werden die Fühler im Öl an einer Stelle gehalten und mittels Referenzthermometer auf den gleichen Wert abgeglichen. Diese Seite ermöglicht die Feineinstellung der Sensoren um den Messfehler zu korrigieren. Für die Drucksensoren wird ein Messbereichsanfang und ein Messbereichsende definiert. Dieser gibt den Arbeitsbereich des Druckaufnehmers an. Der Wert wird mit jedem Wechsel des Druckaufnehmers neu im Baustein eingestellt. Die Einstellungsseite dient ausschließlich dem einmaligen Abgleich der Messsensoren vor der ersten Messung mehrerer Messreihen. Sind sie einmal eingestellt, werden sie nicht mehr verändert, da die Ergebnisse andernfalls nicht miteinander vergleichbar und Effekte nicht zurückführbar auf die Messungen und auf andere gewollte Parameteränderungen sind. Diese sog. Kalibrierungswerte werden in dem SPS-Messsystem unter Maschinendaten dauerhaft abgespeichert und werden somit in ihrem Wert nicht verändert. Die Veränderung wird erst mit einer neuen Eingabe durchgeführt.

### 7.4. Bewertung der automatisierten Aufnahmemöglichkeiten von Energieumwandlungsprozessen

In diesem Kapitel gilt es zwei der bisherigen Aufnahmemöglichkeiten gegenüberzustellen und zu bewerten: die automatisierte und die manuelle bisherige Datenerfassungsmethodik. Für die nachfolgenden Versuchsreihen ist eine genaue Prüfung der beiden Methoden notwendig. Diese

bestimmen die Genauigkeit, Qualität und die Quantität der weiteren Daten und Analyse der Arbeit. Die Bewertung wird mit einer Gegenüberstellung der Kriterien erfolgen.

Kriterium	Ausprägung der Lösung und Vergleich	
Lösung zur Auslesung der Daten	Automatisiert SPS	Ableseverfahren Handeingabe
<b>Aufwand der Berechnung</b>	niedrig	Höher, Tabelle
<b>Komplexität der Lösung</b>	Hoher Programmieraufwand, Formeln hinterlegen	Ausschließlich Eingabe, vorher Formeln verknüpfen
<b>Umsetzbarkeit der Lösung</b>	Komplizierte Umsetzung	schwerfällige Umsetzung
<b>Implementierbarkeit in vorh. Steuerung</b>	einfach	einfach
<b>Ausführbarkeit durch Mitarbeiter</b>	einfach	Ausführbarkeit zufriedenstellend
<b>Detailgenauigkeit, Qualität</b>	Hoch, Messpunkte genau definiert	Durchschnittlich, Messpunkte nicht genau ermittelbar
<b>Quantität der Eingabe</b>	Zyklusnah, aktuell	zyklusnachbereitend
<b>Speicherplatz</b>	Hoch, Applikationen	Niedrig, nur Excel Tabelle
<b>Installationsumfang, Zeit der Installation</b>	Hoch, Programmierung	Durchschnittlich, Formeln verknüpfen
<b>Rechnerkapazität</b>	Hoch, Datenablage und Programmspeicher	Niedrig, nur Excel Tabelle

Tabelle 23: Ausprägungen und Eigenschaften

Deutlicher Schwerpunkt werden in dieser Gegenüberstellung die Punkte der Implementierung in die vorhandene Software, die Umsetzung an sich, die Quantität der Eingabe und schließlich die durch diese Lösung bereitgestellte Datenqualität sein. Die beiden Lösungen werden anhand dieser Kriterien bewertet. Dieses geschieht subjektiv durch die Mitarbeiter des Unternehmens und durch Literaturrecherche. In den Literaturangaben sind die jeweiligen Quellen zu den Infos enthalten.

Werden die Programmierzeiten miteinander verglichen, kann für eine manuelle Datenerfassung mit ca. 1Tag Programmierung und weiteren 2 Tagen zum Testen der Software gerechnet werden. Die Zeit ist wegen des Tests der Produktionsmaschine und des Abgleichs auf das Messsystem nicht verkürzbar. Wird eine vollautomatisierte Lösung vorgezogen, kann mit zwei Tagen Mehraufwand an Programmierung gerechnet werden. Die Maschine muss ebenso getestet und Triggerpunkte müssen angepasst werden. Es muss beobachtet werden, ob die Maschine bei längerem Betrieb verlässliche Werte herausgibt und keine Prozessschwankungen vorkommen.

Die automatisierte Lösung wird ein Unternehmen (hier in der Kunststoffindustrie) in die Lage versetzen, die Messungen beliebig oft wiederholen zu können. Die Maschinen und Prüfstände können somit verändert und neue Messungen aufgenommen werden. Gewissermaßen bauen die Lösungen aufeinander auf, für eine vollautomatisierte Lösung ist das manuelle System notwendig um die Daten erst einmal an das System liefern zu können. Die Qualität und Quantität der Aufnahme der Daten ändern sich jedoch. Datenübertragungsrate und Datengenauigkeit sind jedoch bei der automatisierten Lösung genauer und auch reproduzierbar. Die manuelle Lösung beinhaltet einen hohen Anteil des menschlichen Faktors. Die Messungen könnten unter Umständen nicht reproduzierbar sein.

Nachteile der manuellen Lösung: Die Daten sind mit dem Auge abgelesen und mit der Hand eingegeben. Der Mitarbeiter ist über einen langen Zeitraum mit dem Eingeben der Daten über jeden Zyklus beschäftigt. Dagegen steht die automatisierte Lösung, bei der die Programmierung erst einmal aufwändig durchgeführt werden muss. Es ist viel Speicherplatz für die große Anzahl der Daten notwendig. Dafür sind aber anschließend genauere Daten vorhanden. Das Abwägen der Nachteile führt zur Wahl der automatisierten Lösung.<sup>23</sup> Diese wird zur Untersuchung im folgenden Kapitel angewendet. Es folgen nun die Versuchsreihen zur Effizienzmessung.

## **7.5. Zusammenfassung über mögliche Automatisierungsmethoden**

Das Kapitel stellt mögliche Einstellparameter für Produktionsprozesse dar, welche später mit einer automatisierten Messmethodik analysiert werden können. Beispielsweise werden nach einer Definition eines Grundzustand-Prozesses mögliche Modelländerungen eingepflegt. Diese werden bei den Parametern „Heiztemperatur“, „Öltemperatur“, „Material“, aber auch dem Öl selbst vorgenommen, um Energieeinsparpotentiale mit anderen Hydraulikflüssigkeiten untersuchen zu können. Anschließend werden automatisierte Messmethoden vorgestellt und miteinander verglichen. Nach dieser Auswahl wird mit der SPS-Lösung ein Pflichtenheft mit den Anforderungen an solch ein Messsystem mit automatisierter Messabfolge erstellt. Enthalten sind Parameterinhalte, Kalibriermöglichkeiten für Sensoren und Visualisierungen für die Umsetzung einer solchen Lösung. Die beiden zu Anfang vorgestellten Lösungen werden zum Schluss noch einmal in einer Nutzwertanalyse bewertet. Es erfolgt die praktische Umsetzung und Programmierung des SPS-Messsystems der Firma Beckhoff.

---

<sup>23</sup> Im letzten Teil der Arbeit wird im Kapitel Ausblick 11.3 (S.190f.) jeweils eine Zeitaufnahme für eine automatisierte und eine manuelle Abfolge zur Bewertung der beiden Lösungen durchgeführt.

## 8. Untersuchung und Prozessaufnahme

### 8.1. Einführung in die Versuche

Es folgt der Versuchsplan für eine mögliche Belegung der Labormaschine für die Beschaffung der dafür notwendigen Ressourcen.<sup>24</sup> Die möglichen Parameteränderungen wurden im vorherigen Kapitel der Modellbildung besprochen. Zur Übersicht werden diese Versuchsreihen in der folgenden Aufstellung noch einmal zusammengefasst:

Grundzustände:

- Ermittlung des Grundzustandes mit PPH9020 (Raumbilanz und Prozessbilanz)
- Ermittlung des Grundzustandes PE1800H (Raumbilanz und Prozessbilanz)

Effizienzmessungen:

- Änderung der Heiztemperatur 215°C, 225°C
- Änderung der Heizungsisolierung (mit und ohne ISO)
- Shell Tellus S2 Änderung der Öltemperatur 45°C, 50°C, 55°C
- Änderung auf Tellus S4 Änderung der Heiztemperatur wie oben
- Tellus S4 Änderung der Öltemperatur 45°C, 50°C, 55°C
- Änderung auf DTE10 Excel, Änderung der Heiztemperatur wie oben
- DTE10 Excel, Änderung der Öltemperatur wie oben

Ergänzende Versuche:<sup>25</sup>

- Beeinflussung der Spitzenlast durch Einstellung der Schließkraft
- Beeinflussung des Energieverbrauchs pro Stück
- Durchflussmessung Form, Veränderung Durchfluss
- Flansch Kühlung, Veränderung Durchfluss

---

<sup>24</sup> Abstimmung mit Materialeinkauf für Beschaffung des neuen Öles (Shell S4, Mobil DTE10 Excel), Abstimmung mit Materiallager zur Bereitstellung des anderen Materiales (Tausch PPH9020 mit PE1800H), zum Ölwechsel werden bei jeder Ölsorte drei Tage eingeplant um die Zeit für Spülvorgänge zu berücksichtigen.

<sup>25</sup> Aus Sicht der Firma (Geschäftsführung und Abteilungsleitung) für das Thema Effizienzmessung erforderlich

## 8.2. Vorbereitung der Labormaschine

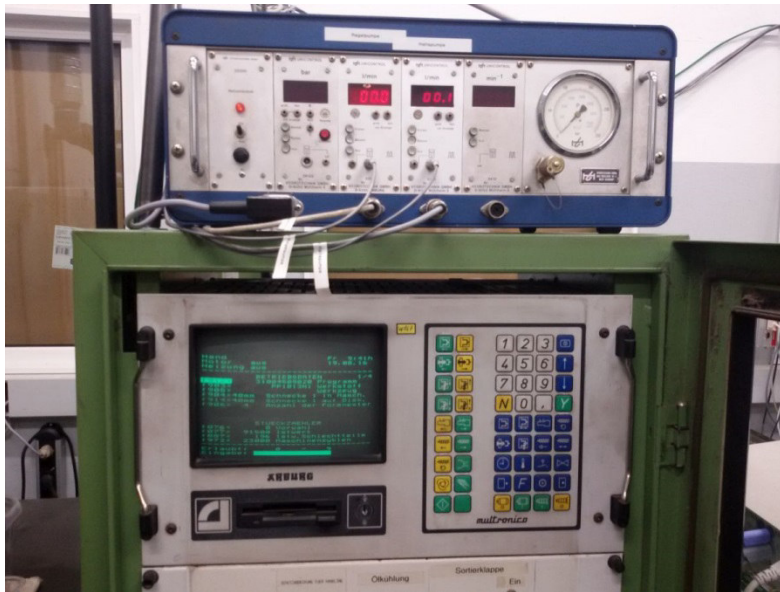


Abbildung 75: Maschinensteuerung und Durchflussmessgerät

Die Vorbereitungen liegen in einer genauen Einstellung und dem Abgleich der Maschinenvoreinstellungen. Eingestellt werden der Schließweg, der Auswerferweg und der Einspritzweg. Die jeweiligen Wege werden auf den 0-Punkt abgeglichen. Die Erfassung des Nullpunktes erfolgt mit der Wegstrecke in der SPS. Ist der 0-Punkt auf der Maschinensteuerung erreicht, wird auch im SPS-System der 0-Punkt mit dem Wert 0 angezeigt. Dieses ist für die Berechnung der Einspritzarbeit von hoher Bedeutung um die Integration vom 0-Punkt beginnen zu lassen.

### 8.2.1 Vorbereitung der Datenerfassung

Zur Datenerfassung werden die Ausgangswerte an den jeweiligen Klemmen in der Hardware (Systemmanager) mit denen in der Software (PLC-Control) erneut verglichen. Die 0-Werte haben hardwaretechnisch und softwaretechnisch übereinzustimmen. Die PLC-Control Werte lassen sich in den Globalen Variablen mit den Werten zu den jeweiligen Klemmen im Systemmanager vergleichen. Die jeweiligen Einstellungen des Materials (unterschiedliche Einspritzwege) werden im Baustein „Sensoren\_Einlesen“ neu eingestellt.

Werden die Werte der Größen auf dem Bildschirm alle korrekt wiedergegeben, kann eine Testmessung auf automatischer Ebene zur Kontrolle der Messung und Kumulation aller Bilanzgrößen erfolgen.

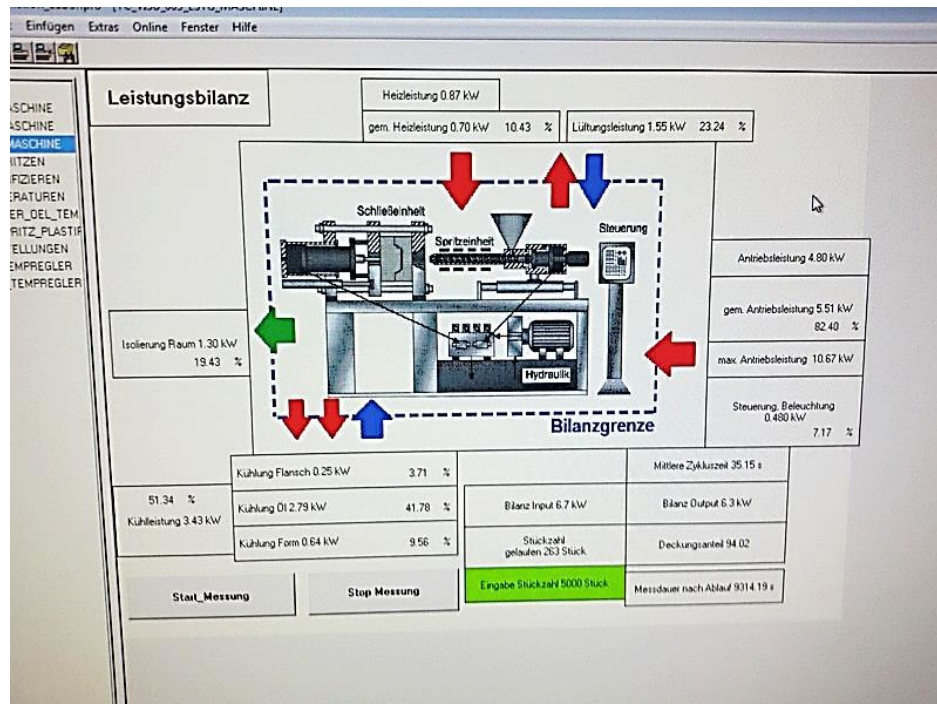


Abbildung 76: Leistungswerte Raumbilanz im Maschinentest

Die Abbildung 76 oben soll zeigen, dass nach Abschluss eines Zyklus alle Bilanzgrößen korrekt (in realistischen Werten!) und in richtigem Zahlenwert wiedergegeben werden. Mit den Voreinstellungen beträgt nach einer längeren Einlaufzeit der Maschine die Bilanzdeckung 94,02%. Die Zykluszeit vom Signal „Schließen“ des ersten Zyklus bis zum nächsten Signal „Schließen“ beträgt 35,15 Sekunden. Die Daten werden an der Maschinensteuerung bestätigt. Das System arbeitet korrekt und ist zur Messung bereit.

### 8.2.2 Vorbereitung Monitoring

Die Ermittlung der Daten und die Aufzeichnung des Systems wird wie schon im vorherigen Teil der Arbeit beschrieben mit der Software TWIN Cat SCOPE View 2 festgehalten. Die Software wird auf die Variablen in der Versuchsreihe abgeglichen. Die notwendigen Variablen werden mittels „Target Browser“<sup>26</sup> in die notwendige Messung miteinbezogen. Die genaue Durchführung dieses Schrittes entnehmen sind dem Handbuch der Software im Internet zu entnehmen.

<sup>26</sup> Target Browser, d.h. eine Ziel Definition für eine Selektion bestimmter nützlicher Information, überflüssige Daten werden vernachlässigt. Die Daten werden schon jetzt priorisiert.



Die Scope Software wird zum Aufzeichnen der Daten verwendet. Für die Messungen der Bilanzrechnungen (Raumbilanz, Einspritzen und Plastifizieren) wird die Sample Time<sup>27</sup> auf 100ms gestellt. Dieses hat eine Auflösung von 10 Punkten im Intervall von 1 Sekunde zur Folge. Für Messungen innerhalb eines Spritzgießzyklus wird eine Sample Time von 10ms eingestellt. Die Leistungsspitzen lassen sich somit besser aufnehmen. Dieses haben vorab angelaufene Testreihen gezeigt. Die Aufnahmedauer wird auf 8h Messung gestellt. Die Zeitachse unten am Diagramm wird zwischen 1 und 4h gewählt um auf Veränderungen innerhalb der Bilanzgrößen aufmerksam werden zu können.

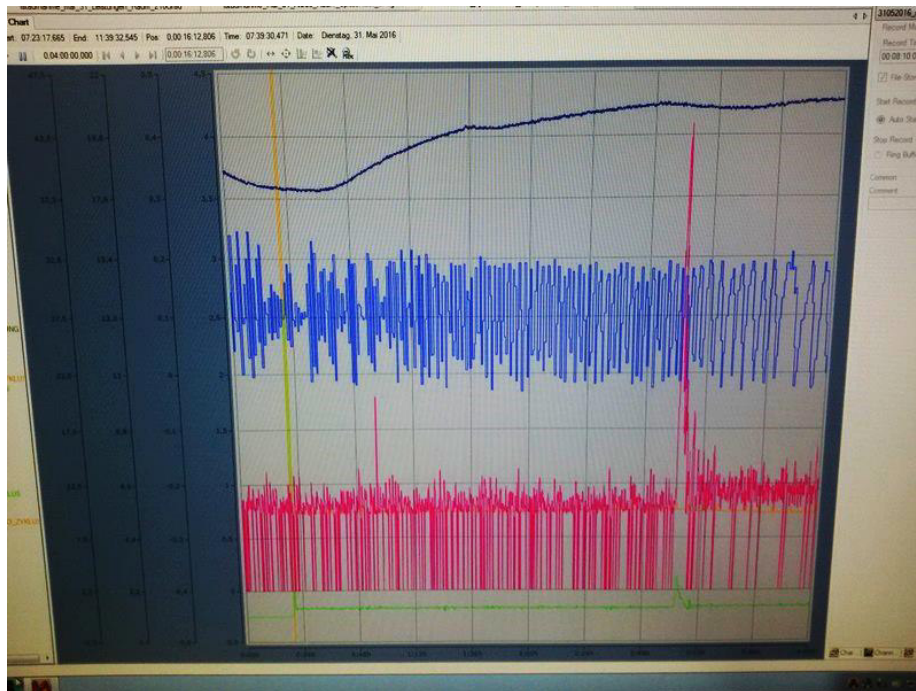


Abbildung 77: Datenmonitoring in SCOPE Software<sup>28</sup>

Die y-Achsen werden in einem für die Messung überschaubaren Maßstab gewählt. Die Variablen lassen sich zu unterschiedlichen y-Achsen zuordnen um die Größenvergleiche und unterschiedlichen Leistungsgrößen besser sichtbar machen zu können. Die Leistungsgrößen bewegen sich z.B. auf anderem Niveau als die Öltemperatur. Die Öltemperatur wird oben in der Abbildung als dunkelblaue Linie dargestellt. Die maximale Leistung als hellblaue Linie. Die mittlere Heizleistung als rote Linie. Durch die richtige Skalierung werden sofort die Null-Durchgänge der Heizung erkannt. Die Spitzenleistung oben schwankt um zwei Felder und die Abstände werden mit der Zeit größer. Die

<sup>27</sup> Zykluszeit der Abtastrate lässt sich variabel einstellen um Datenmenge zu reduzieren. Bei der Messung der Einspritzarbeit bei unterschiedlichen Ölen wird diese Funktion zu einem größeren Wert von 500ms verändert werden.

<sup>28</sup> Abbildung aus Scope Software, während der Versuchsreihen aufgenommen.

Öltemperatur steigt kontinuierlich und nähert sich immer mehr einem Maximum. Auf die genauen Werte wird im Ergebnisteil der Arbeit eingegangen. Es soll hier vorerst das Messsystem mit der Durchführung der Messung im Vordergrund stehen.

### 8.2.3 Nach-Kalibrierung Öl-Durchflussmessung und Luftstrommessung

Vor Beginn der eigentlichen Messung werden die Kalibrierwerte an den Durchflussmessgeräten (Messturbinen) erneut eingestellt. Über die Messung der Windgeschwindigkeit wurde im letzten Kapitel der Arbeit schon berichtet. Eine erneute Messung des Volumenstromes der Abwärme wird hier im Vordergrund stehen, die Umwelteinflüsse ändern sich von Tag zu Tag in der Laborumgebung. Vor den eigentlichen Versuchen sind diese erneut abzu prüfen. Die Absaugeinrichtung wird wie schon beschrieben an einer Stelle (dem Lufterinlauf) mit einem Loch in der Mitte des Rohres versehen.

### 8.2.4 Abgleich Temperaturfühler

Der Abgleich der Temperaturfühler erfolgt mit der Visualisierung der Parametereinstellung (siehe Seite 117, Abbildung 74). Die Parameter Einstellungsseite erlaubt die gleichzeitige Betrachtung aller Temperaturfühler der Formkühlung (Rücklaufkanäle A, B, C) und auch der Temperaturen des Öls (Regelpumpe, Haltepumpe, Öltank). Die Temperaturen werden so eingestellt, dass ihr Wert bei Raumtemperatur vor dem Einschalten der Maschine die gleiche Größe anzeigt. Die Werte zwischen Öltank und Regel- sowie Haltepumpe bedürfen einer sorgfältigen Einstellung um in den folgenden Messungen eine genaue Temperaturdifferenz zu erhalten. Diese bestimmt letztendlich den Wärmestrom der Hydraulikpumpen (siehe vorheriges Kapitel).



Abbildung 78: Kalibrierung Temperaturfühler



Haben die Temperaturen nach Einstellung einen gemeinsamen Wert der Raumtemperatur erreicht, erfolgt die Abstimmung mit dem Temperaturmessgerät. Die Werte der Temperaturen der SPS-Sensoren werden mit dem Wert der Anzeige des Messgerätes verglichen. Das Messgerät wird als genaueste Messeinrichtung als Richtwert für diese Messung angenommen. Für die weiteren Messungen ist die o.g. Temperaturdifferenz (Wärmestrom) ausschlaggebend. Es zählt somit die relative Abweichung der Fühler und nicht jeder absolute Wert. Für die Messung werden diese Werte anschließend nicht mehr verändert. Es werden nur die Eingangsparameter der in der Modellierung besprochenen Tabelle verändert. Das Messsystem bleibt unangetastet.

Abbildung 78 beschreibt den Abgleich der Temperaturfühler im Öltank mit dem Testo-Messgerät. Die Messung erfolgt mit den Fühlern in dem gleichen Bereich in unmittelbarer Nähe des eingebauten Temperaturfühlers der Maschine. Die Messergebnisse können somit direkt verglichen und Temperaturschwankungen durch andere Fühlerplatzierung ausgeschlossen werden.

### 8.3. Ermittlung Grundzustand, Prozessaufnahme

Versuchsdurchführung: Die Maschine wird mit den gegebenen Eingangsparametern wie in der Modellierung beschrieben eingeschaltet. Es werden die Standard Parameter gefahren. Ein Grundzustand mit PPH9020 und der andere Grundzustand mit dem Material PE1800H. Die Eingangswerte werden durch das Monitoring in folgender Tabelle 24 abgespeichert:

Grundzustand01

A R B U R G      Istwertprotokoll

Program                    3100450      Einspritzzeit  
Datum                      09.05.16  
Wochentag/Uhrzeit        Mo 07:09

f1403 = Protokollzykluszaehle  
f077 = Stueckzaehler  
t305M = Einspritzmesszeit 1  
t402M = Dosiermesszeit 1  
t902M = Gesamtzykluszeit  
V321M = Massepolster 1  
V311M = Weg Nachdruckumsch.1  
T801 = Heizzone 1  
T805 = Heizzone 5

Bezeich	f1403	f077	t305M	t402M	t902M	V321M	V311M	T801	T805
Einheit		Stk	sec	sec	sec	ccm	ccm	Grad	Grad
Sollw.	9999	0	4,00	10,0	50,0	4,0	7,0	205	215
1	16132	1,05	2,1	35,0	4,1	6,9	205	215	
2	16136	1,05	2,1	35,1	4,2	6,8	205	215	
3	16140	1,06	2,1	35,0	4,2	6,9	205	215	
4	16144	1,05	2,1	35,0	4,4	6,9	205	215	
5	16148	1,04	2,1	35,0	4,3	6,8	206	216	

Zykluszeit      Heiztemperaturen

Tabelle 24: Maschinenparameter, Monitoring<sup>29</sup>

<sup>29</sup> Weitere Informationen zu den Maschinenparametern entnehmen Sie bitte dem Anhang unter „ 13.20 Zykluszeiten“.

## 8.4. Parameteränderungen

### 8.4.1. Shell Tellus S2 Änderung der Öltemperatur

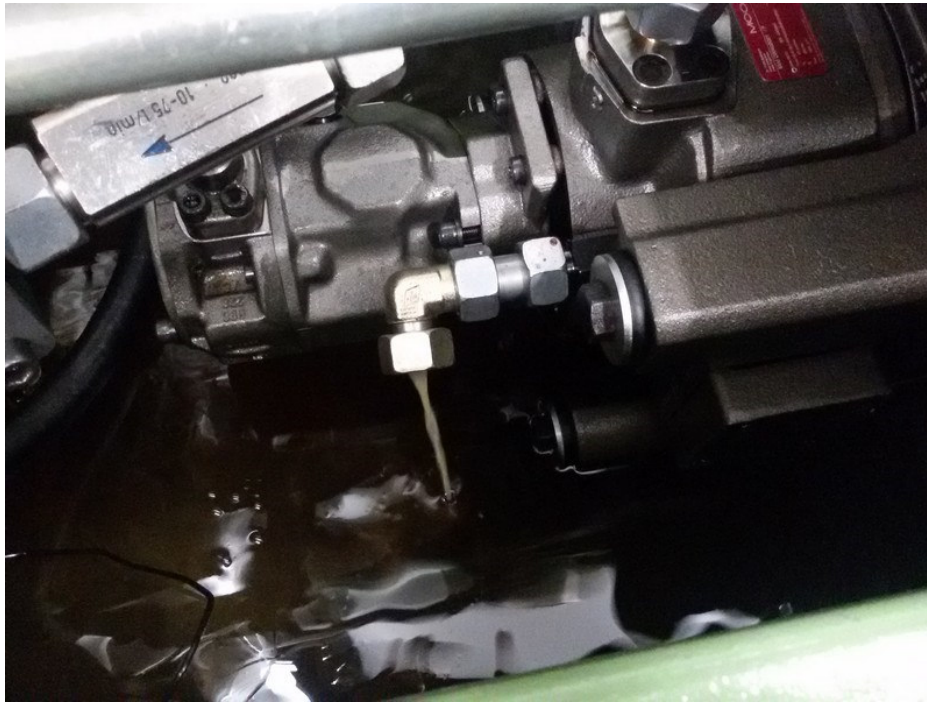


Abbildung 79: Leckölmenge Regelpumpe, Tellus S2 Öl

Die Parameteränderungen der Öltemperatur erfolgen in fünf Grad Schritten. Angefangen mit einer Temperatur von 45°C (der lt. Firma optimalen Arbeitstemperatur) wird anschließend 50°C und schließlich 55°C gefahren. Die 60°C Marke wird nur kurz angeschnitten um Messprobleme (Maschineschutzeinrichtung) und Öl-Alterungserscheinungen zu vermeiden. Der Hersteller warnt vor hohen Arbeitstemperaturen um das Öl nicht schnell altern zu lassen. Die erste Messung erfolgt mit einem Austausch des gleichen Öles wie schon vorher verwendet. Das neue Shell Tellus 46 weist eine frische helle Farbe auf. Vor der eigentlichen Messreihe findet eine Spülung statt um Reste des alten Öles zu minimieren. Das Spülen erfolgt immer mit dem neuen Öl gleichen Typs.

### 8.4.2. Shell Tellus S2 Änderung der Heiztemperatur

Die Änderung der Heiztemperatur erfolgt in 10 Grad Schritten. Die Temperaturen 215°C (Ausgangszustand), 225°C und zu Testzwecken 235°C werden angefahren. Die Ergebnisse 215°C und 225°C sind aber für den Ergebnisteil am interessantesten. Die Temperatur 235°C wird in der Produktion der Firma nicht gefahren und erfordert einen zu hohen Anteil an Heizleistung. Dieses haben vorherige Studien der Firma schon erwiesen. Gefordert wird ein Test mit 215 und 225°C. Die Aufnahme berücksichtigt ein gründliches Monitoring der aktuellen Heizleistung um 0-Punkte (alle Heizzonen ausgeschaltet) erkennen zu können. Für die Raumbilanz wichtig sind die Größen mittlere Heizleistung und max. Heizleistung.

Heiztemperaturaenderung01

A R B U R G      Istwertprotokoll

Programm                      3100450  
Datum                          11.05.16  
Wochentag/Uhrzeit            Mi 07:11

f1403 = Protokollzykluszaehle  
f077 = Stueckzaehler  
t305M = Einspritzmesszeit 1  
t402M = Dosiermesszeit 1  
t902M = Gesamtzykluszeit  
V321M = Massepolster 1  
V311M = Weg Nachdruckumsch.1  
T801 = Heizzone 1  
T805 = Heizzone 5

Heiztemperatur an  
Düse und am  
Flansch erhöht

Bezeich	f1403	f077	t305M	t402M	t902M	V321M	V311M	T801	T805
Einheit		Stk	sec	sec	sec	ccm	ccm	Grad	Grad
Sollw.	9999	0	4,00	10,0	50,0	4,0	7,0	205	215
1	16500	1,05	2,1	35,0	4,1	6,9	225	225	
2	16501	1,05	2,1	35,1	4,2	6,8	225	225	
3	16502	1,06	2,1	35,0	4,2	6,9	225	225	
4	16503	1,05	2,1	35,0	4,4	6,9	225	225	
5	16504	1,04	2,1	35,0	4,3	6,8	225	226	

Tabelle 25: Maschinenparameter, Heizungstemperaturänderung

#### 8.4.3. Shell Tellus S2 Änderung der Heizungsisolierung

Die Änderung der Heizungsisolierung wird vor Beginn des Aufheizens der Maschine im ausgeschalteten Zustand vorgenommen. Es werden die einzelnen Heizbänder mit einer Glasfaserstoff-Isolierung versehen. Die Isolierungen liegen fest an den Heizbändern und sind anschließend wieder abnehmbar um den Ausgangszustand der Maschine für die Öltemperaturmessung wieder herstellen zu können.

#### 8.4.4. Änderung auf S4 Änderung der Öltemperatur

Die Änderung auf ein anderes Öl wird wieder durch eine Spülung mit dem gleichen neuen Öl Shell Tellus S4 begonnen. Es ist transparent und auf synthetischer Basis sowie geruchsarm. Die Messung wird erneut mit unterschiedlichen Öltemperaturen (45°C, 50°C und 55°C) durchgeführt. Anschließend erfolgt eine Messung mit unterschiedlichen Heiztemperaturen (215°C und 225 °C). Während der Messung werden wieder Parameter der Regelpumpe und Haltepumpe (Durchfluss und Rücklauftemperaturen) aufgenommen. Die Leckölmengen und die Konvektionsgrößen werden bei diesem Öl erneut bestimmt. Es wird erneut eine Gewichtsmessung zur Bestimmung der Dichte vorgenommen. Die Farbe des Öles im Tank lässt durch ihre Durchsichtigkeit das Erkennen der einzelnen Komponenten der Maschine (wie Saugbereiche, Saugkörbe und Ölleitungen) zu. Diese waren mit dem vorherigen Shell Tellus S2 Öl nicht erkennbar. Das lässt auf die synthetische

Eigenschaft des Öles schließen. Die Ergebnisse der Messung werden im kommenden Kapitel 9 besprochen werden.



Abbildung 80: Änderung der Hydraulikflüssigkeit Tellus S4

#### **8.4.5. Änderung auf DTE10 Excel, Änderung der Öltemperatur**

Die Messung des Öles auf DTE10 Excel findet nach der Spülung statt. Das Öl weist eine bräunliche Farbe auf und ist wieder auf Mineralbasis. Es ist nicht geruchsarm wie das vorhergehende Shell Tellus S4. Es sollen laut Hersteller auch hier Energieeinspareffekte vorhanden sein.



Abbildung 81: Änderung der Hydraulikflüssigkeit Mobil DTE10 EXCEL

Das Öl weist aus den Leckölleitungen eine ähnliche Farbe wie das Shell Tellus S4 Öl auf, im Tank wird aber der bräunliche Farbton sichtbar. Es werden wieder Messreihen mit einer Änderung der Öltemperatur in fünf Grad Schritten gefahren und die Daten zu Raumbilanz und Prozessbilanz (Einspritzen Plastifizieren) aufgenommen.

## 8.5 Einstellgrößen der Maschine Parameterveränderungen und Auswirkungen auf den elektrischen Energieverbrauch

### 8.5.1 Veränderung der Kühlzeit

Durch die Änderung der Kühlzeit soll der mittlere Energieverbrauch durch eine Senkung der Kumulationszeit erreicht werden. Die Senkung der Kühlzeit beginnt mit der Messung im Ausgangszustand von 25s und wird in 1 Sekunden-Schritten auf 20s abgesenkt. Es wird dabei immer die Produktqualität aufgenommen. Die Proben werden gewogen und anschließend werden die Teile gemessen (Durchmesser innen, Durchmesser außen und Wandstärke).



Abbildung 82: Maschinensteuerung Kühlzeitänderung

Die obere Abbildung zeigt die Veränderung der Kühlzeit bei der Maschinensteuerung. Die Änderung der Kühlzeit wird ebenso von der SPS Steuerung als Zyklusverkürzung um eine Sekunde wahrgenommen. Die Steuerung wird somit durch die SPS in der Verkürzung kontrolliert. Es wird ausschließlich nur diese eine Zeit t400 geändert. Alle anderen Komponenten werden beibehalten.



### 8.5.2 Veränderung des Schließdrucks

Die Veränderung des Schließdrucks erfolgt in 20bar Schritten. Der voreingestellte Schließdruck im Ausgangszustand beträgt 110bar. Die folgenden Schließdrücke, die angefahren werden, sind 90bar, 70bar und 50bar. Die Veränderung wird manuell mit einem Druckregler an der Maschinenseite vorgenommen. Die genaue Stelle, an der der Schließdruck hydraulisch geregelt werden kann, d.h. das Einwirken des Reglers im Hydrauliksystem, ist dem Hydraulikplan im Anhang unter 13.2, S.201 zu entnehmen. Der jeweilige Druck wird an der Druckanzeige (Manometer) über dem Druckregler abgelesen. Die folgende Abbildung zeigt die Druckanzeige mit einem Schließdruck von 70bar.



Abbildung 83: Anzeige Zuhaltedruck

Der linke Regler dient zur Einstellung des Zuhaltedrucks, der rechte zur Einstellung des Düsenanlagedrucks und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Wird in dem o.g. Text, in der Maschinenbeschreibung und in der Abbildung von Schließkraft gesprochen, ist nicht der während des Zufahrens wirkende Druck gemeint, sondern die anschließend auftretende Zuhaltkraft. Die Bezeichnung Zuhaltkraft mit der Einheit bar vom Maschinenhersteller ist physikalisch nicht korrekt, sondern bezieht sich auf die Werkzeugfläche von ca.  $485\text{cm}^2$  bei 85 kN Schließkraft (wie die Maschinenbezeichnung lautet). Diese Größe kann mit ( $p=F/A \rightarrow A=F/p \rightarrow A=85000\text{N}/17500000\text{Pa} = 0,049\text{m}^2$ ) einfach hergeleitet werden.

## 8.6 Veränderung des Durchflusses der Flanschkühlung und Auswirkung auf den thermischen Energieverbrauch

Die Veränderung des Durchflusses der Flanschkühlung dient der Energieeinsparung der Heizleistung und einer Reduzierung der abgegebenen Wärmemenge an den Ölkühlkreislauf. Die Flanschkühlung dient der Verhinderung des zu schnell schmelzenden Granulats in der Eintrittsöffnung der Schnecke beim Plastifizierungsvorgang. Die Flanschkühlung wird mit einer Durchflussreduzierung von 4,2 l/min bis schließlich einer minimal zu messenden Durchflussmenge von 1,7 l/min gefahren. Es werden die Temperaturen des Flansches durch einen Temperatursensor gemessen. Zusätzlich werden Bilder mit Infrarotkamera aufgenommen. Diese dienen im späteren Teil der Arbeit der Auswertung.

Dem Datenmonitoring werden die Kurven des Flanschdurchflusses, der Temperatur sowie die mittlere Antriebsleistung und die aktuelle Heizleistung eingegeben. Die zwischen den Durchflussmengen auftretenden Sprünge sind dem Einpendeln der Wassermenge durch eine analoge Einstellung des Kugelventils zuzuordnen. Die Durchflüsse gehen somit kurz auf 0 l/min und sind unbeabsichtigt. Die genauen Werte werden im Ergebnisteil der Arbeit besprochen. Ab einer Durchflussmenge unter 1,7 l/min bricht die Messung ab. Kleinere Werte werden von dem Sick-Durchflussmessgerät nicht mehr erfasst. Wird die Wassermenge komplett abgestellt, steigt die Flanscht Temperatur quasi ins Unermessliche. Sie ist aber somit keinem Durchflusswert mehr zuzuordnen und kann dann aus keiner Messreihe abgeleitet werden.

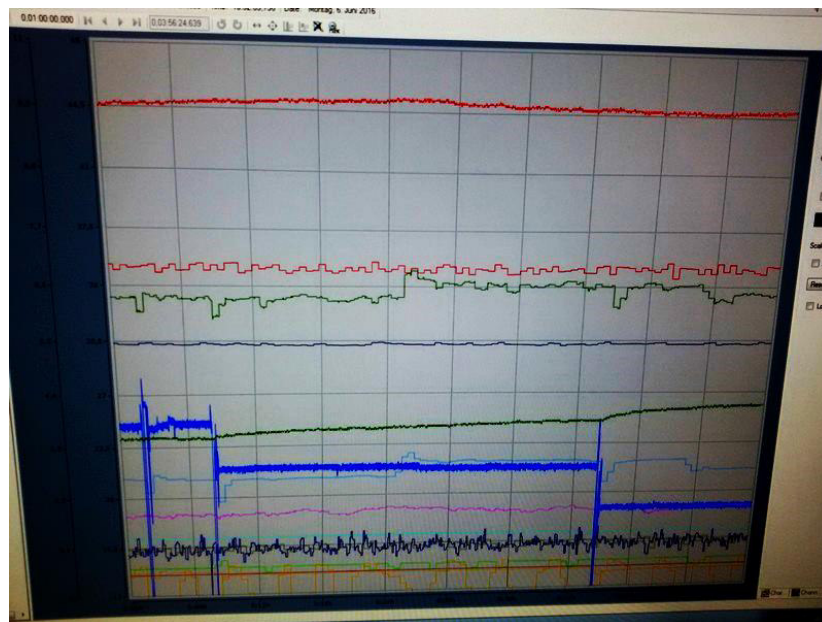


Abbildung 84: Scope Ansicht, Änderung Flanschdurchfluss<sup>30</sup>

<sup>30</sup> Abbildung aus Scope Software, während der Versuchsreihen aufgenommen.

Die obere Abbildung zeigt den Durchflussversuch mit der Software SCOPE. Mit aufgenommen werden Öltemperatur (rote Kurve oben), Input (rote Kurve Mitte) und Output (grüne Kurve Mitte) der Bilanz, sowie mittlere Antriebsleistung (dunkelblaue Kurve Mitte) und die Flanschttemperatur (dicke blaue Linie unten). Unten zusätzlich aufgeführt sind die aktuelle Leistung der Heizzonen und die aktuelle Leistung der Ölkühlung.

### **8.7. Zusammenfassung der Versuchsdurchführung**

Die Versuche werden mit dem o.g. automatisierten Messverfahren durchgeführt. Die Vorbereitungen beinhalten eine Versuchsplanung über die mögliche Belegung der Labormaschine für die Beschaffung der dafür notwendigen Ressourcen.

Die Versuchsreihen bedürfen einer Vorbereitung der Datenerfassung mittels geeigneter Scope Software (als Monitoring der Bilanzinput- und Bilanzoutputdaten) und der Erfassung der Maschinendaten (ausgelesen aus der Steuerung). Das Messsystem wird durch eine erneute Kalibrierung der Öl-Durchflusssensoren und der Temperaturfühler (für die Raumluft und die Wasserkühlung) vorbereitet.

Anschließend werden die Messreihen nach dem Versuchsplan aufgenommen. Es werden die in der Modellbildung geplanten Parameteränderungen durchgeführt und in einer Übersicht noch einmal zusammengefasst. Grundzustände, welche den Austausch des Materials PPH9020 und PE1800H beinhalten, sowie Effizienzmessungen mit einer Heizungsisolierung, unterschiedliche gefahrene Heiztemperaturen sowie unterschiedliche Öltemperaturen sollen untersucht werden. Ergänzende Versuche zur Beeinflussung der Spitzenlast durch Einstellung der Schließkraft sowie der Beeinflussung des Energieverbrauchs pro Stück und auch Versuchsreihen mit der Reduzierung des Flanschdurchflusses bilden den Abschluss des praktischen Versuchsteils.



## 9. Ergebnisse der Prozessaufnahme

### 9.1. Grundzustand

#### 9.1.1. Ergebnis des Grundzustandes mit PPH9020

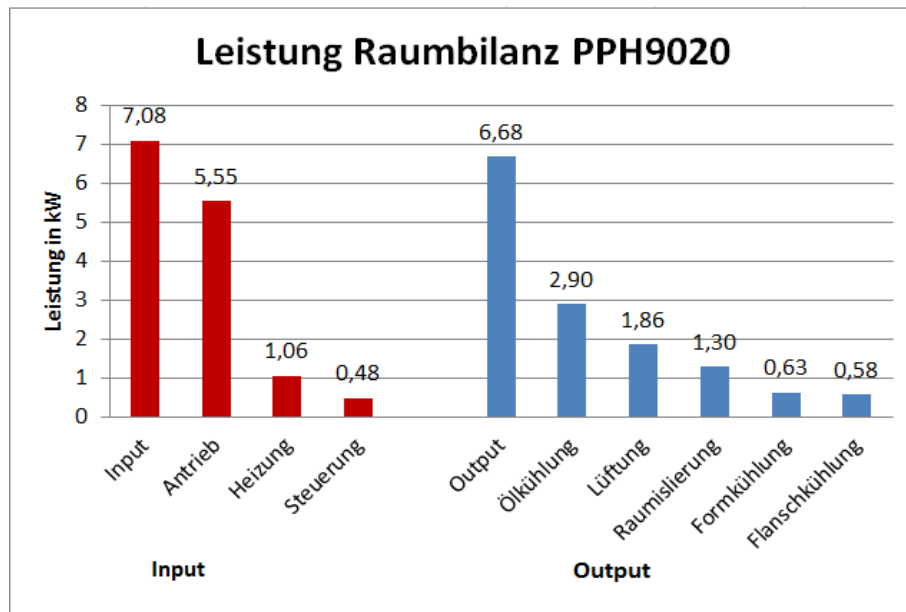


Abbildung 85: Ergebnisse Grundzustand Raumbilanz PPH9020

Die Ergebnisse im Grundzustand zeigen in der oberen Abbildung die Aufteilung der Raumbilanz, beginnend mit der Input Summe in kW, gefolgt von der Output-Summe. Die einzelnen Komponenten sind in ihrer Größenordnung gleich denen der im Vorversuch ermittelten Größen. Die Komponenten werden nach dem Paretoprinzip (der Größe nach) geordnet. Die mittlere Leistung steht mit 5,55kW an der Spitze der Input Komponenten. Die Heizleistung und die Steuerung und Beleuchtung folgen mit 1,06kW und 0,48kW. Von den Output Komponenten ist die Kühlwasserleistung mit 2,90kW die stärkste Komponente. Die Lüftungsenergie beträgt 1,86kW, gefolgt von der Raumisolierung mit 1,3kW (statische Berechnung). Die Formkühlung hat im Vergleich zur Ölkühlung nur 0,63kW. Die in der Ölkühlung enthaltene Flanschkehlung beträgt 0,58kW. Diese wird in den letzten Versuchsreihen genauer untersucht. Zu dieser Versuchsreihe ist hinzuzufügen, dass die mittlere Leistung der Luft als Output und die Steuerung und Beleuchtung als Input als konstant angenommen werden. Ihre Größe wurde im vorherigen Teil der Vorversuche schon berechnet bzw. die dafür notwendigen Größen gemessen und erklärt. Die Leistungen betragen für die Wärmeübergänge durch die Wände gemittelt: 1,3kW. Der Verbrauch für Steuerung und Beleuchtung ist konstant immer mit 0,48kW anzunehmen. An diesen Werten wird sich in den folgenden Versuchsreihen nichts ändern. Innen- und Außentemperaturen sowie Stromverbräuche der Steuerung werden für die Berechnung dieser Größen immer konstant gehalten.

### 9.1.2. Änderung von Material PPH9020 auf PE1800H

Die Umstellung auf ein anderes Material zählt wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt zu einem weiteren Ausgangszustand. Beginnend hier wieder mit der Input Summe von 7,11kW gefolgt von der Output Summe 6,63 kW. Die mittlere Leistung steht mit 5,60kW an der Spitze der Input Komponenten und ist somit ggü 5,5kW bei dem Material PPH6020 um ca. 2% gestiegen. Die Heizleistung und die Steuerung und Beleuchtung sind die gleichen Größen wie im PPH Modell und folgen mit 1,06kW und 0,48kW. Von den Output-Komponenten ist hier auch die Kühlwasserleistung mit 2,86kW die stärkste Komponente. Die Lüftungsenergie beträgt 1,86kW gefolgt von der Raumisolierung mit 1,3kW. Die Formkühlung hat im Vergleich zur Ölkühlung nur 0,62kW. Die in der Ölkühlung enthaltene Flanschkühlung beträgt 0,52kW.

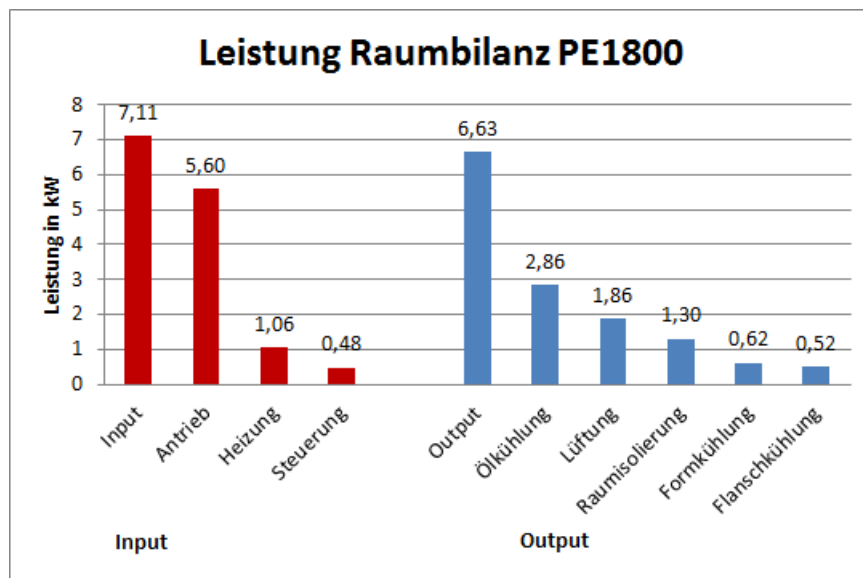


Abbildung 86: Ergebnisse Grundzustand Raumbilanz PE1800H

Die Einspritzgrößen werden mit den Materialien PE1800H und PPH9020 in einer Abbildung dargestellt. Die größten anteiligen Arbeiten sind natürlich die Inputgröße der elektrischen Einspritzarbeit mit 10,74kWs bei PE1800H und 7,22kWs bei PPH9020. Die Lecköl-Wärmearbeiten der Regelpumpe und der Haltepumpe sind die größten Output-Komponenten mit 5,06kWs für Regel- und Haltepumpe in Summe beim Material PE sowie 3,62kWs beim Material PPH. Die an dem Bilanz-Output gewollte Größe der hydraulischen Einspritzarbeit beträgt 1,38kWs für PE und 0,78kWs für PPH. Die spezifische Einspritzarbeit direkt an der Düse der Maschine beträgt 1,18kWs für das Material PE und 0,73kWs für das Material PPH. Die Werte entsprechen mit einigen Abweichungen den hydraulischen Arbeitswerten. Die eigentlichen Anteile der Hydraulikpumpen mit ihrer abgegebenen Förderarbeit betragen bei PE1800H für beide Pumpen in Summe 2,24kWs. Für PPH9020 sind es 1,44kWs. Die genauen Daten der einzelnen Pumpen entnehmen Sie bitte der Übersichtstabelle im Anhang der Arbeit unter Punkt 13.9, S.214 „Parametertabelle Einspritzen“.

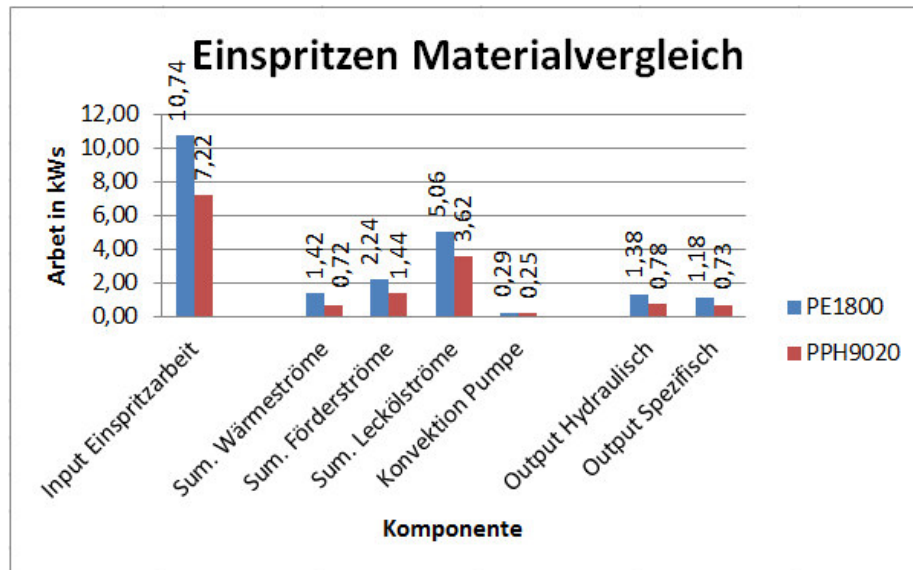


Abbildung 87: Ergebnisse Einspritzen Materialvergleich

Werden die Plastifiziergrößen im Ausgangszustand betrachtet sind folgende Ergebnisse sichtbar: Auch hier werden die Materialien PE1800H und PPH9020 in einer Abbildung dargestellt. Hier sind die größten Arbeiten natürlich ebenfalls die Inputgrößen der elektrischen Plastifizierarbeit mit 20,13kW bei PE1800H und 16,25kW bei PPH9020. Die Lecköl-Wärmearbeiten der Regelpumpe und der Haltepumpe haben auch hier einen großen Anteil mit 4,6kW für die Summe beider Pumpen bei verwendetem Material PE1800H und 4,02kW beim Material PPH9020. Die an dem Bilanzoutput eigentliche gewollte Größe der Plastifizierarbeit des Dosiermotors beträgt 5,55kW für PE und 4,06kW für PPH. Die eigentlichen Anteile der Hydraulikpumpen mit ihrer abgegebenen Förderarbeit für beide Pumpen in Summe betragen 7,34kW bei PE1800 und 5,35kW bei PPH9020. Die genauen Daten entnehmen Sie bitte auch der Übersichtstabelle im Anhang der Arbeit unter 13.10, S.216 für diesen Vorgang der Plastifizierung.

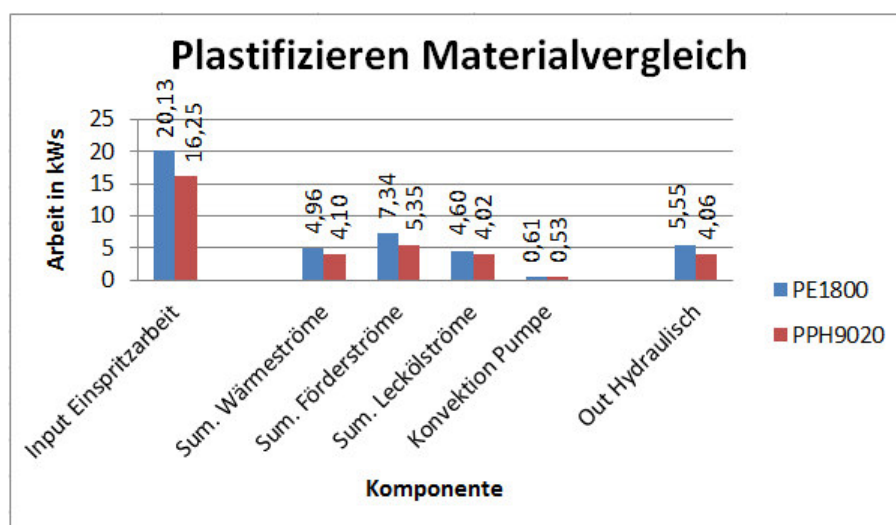


Abbildung 88: Ergebnisse Plastifizieren Materialvergleich

## 9.2. Parameteränderungen

### 9.2.1. Änderung der Heizungsisolierung

Die Änderung der Heizungsisolierung stellt den ersten Teil der Parameteränderungen dar. Die Ergebnisse belaufen sich wie folgt: Die Größenaufteilung ähnelt der des Ursprungszustandes. Insgesamt sind mit Isolation der Heizbänder der Energieinput und auch der Energieoutput etwas niedriger. Die mittlere Antriebsleistung sinkt etwas. Andere Komponenten bleiben in etwa gleich. Groben Einfluss auf die Bilanz haben die sich sinkende mittlere Heizleistung und die daraus resultierende ändernde Lüftungsleistung.

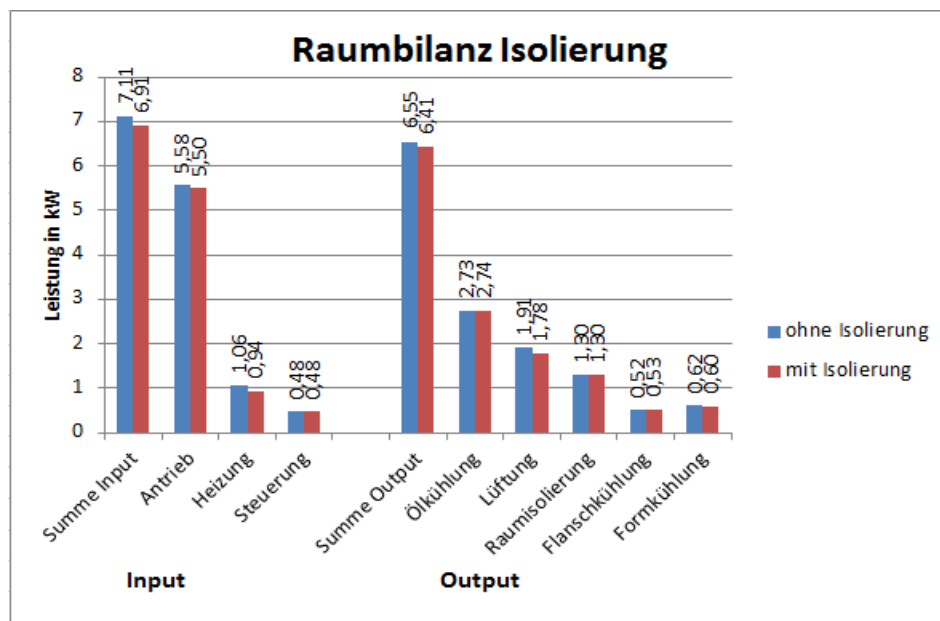


Abbildung 89: Ergebnisse Raumbilanz mit und ohne Heizungsisolierung

### 9.2.2. Änderung der Heizungstemperatur, Leistungen Raum

Die erste Änderung der Heiztemperatur wird wieder ohne Isolierung durchgeführt. Demnach steigen die mittlere Heizleistung und die Lüftungsleistung wieder. Wird die Temperatur von 190°C auf 225 Grad Heiztemperatur eingestellt, ist eine Leistungszunahme der mittleren Heizleistung als Input und eine Zunahme der Lüftungsleistung als Output ähnlich der Isolationsveränderung zu verzeichnen. Die Änderung beträgt hier wie auch im oberen Beispiel um die 100Watt. Es ändern sich diese beiden Komponenten am größten. Der Antriebsleistung sinkt leicht. Die Messung mit 215°C wird in dieser Reihe nicht aufgeführt. Die Änderungen können durch ihren geringen Anteil nur schwer dargestellt werden. Es bedarf einer höheren Temperaturdifferenzeinstellung. Die folgende Abbildung verdeutlicht noch einmal die Unterschiede der Temperatureinstellung 190°C und 225°C ohne eine

Isolierung der Heizung. Genaue Zahlen entnehmen Sie bitte dem Anhang unter 13.8, S.212 in der Übersichtstabelle. Die Raumisolierung wurde wegen statischer Berechnungen nicht berücksichtigt.

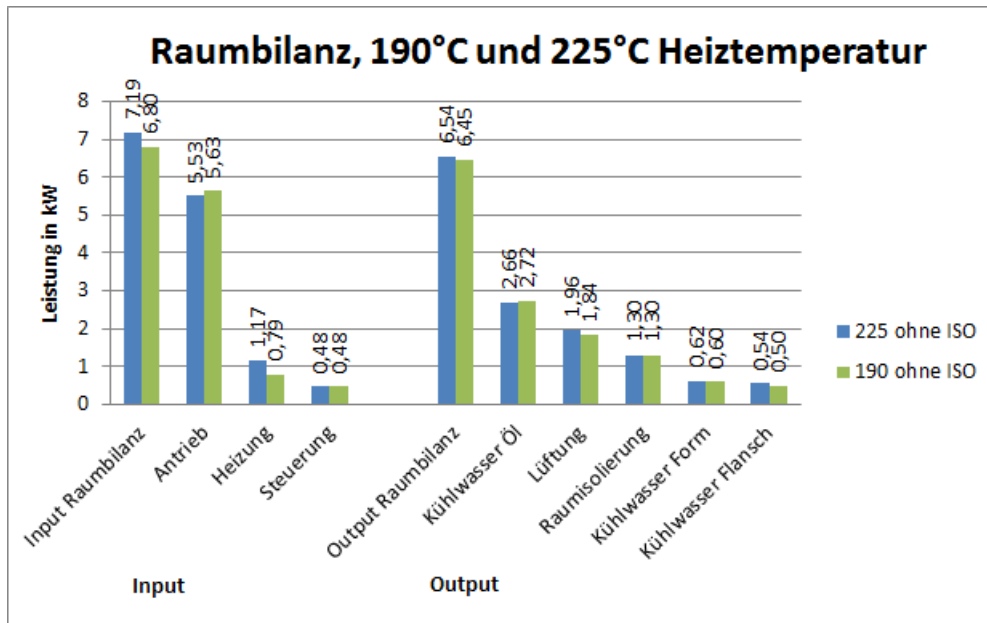


Abbildung 90: Ergebnisse Änderung der Heiztemperatur

Es lässt sich 190°C die kleinste Heizleistung und auch Lüftungsleistung messen. Bei 225°C ist natürlich auch die Lüftungsleistung höher. Das Diagramm zeigt, dass sich außer der Heizungs- und Lüftungsleistung auch die Antriebsleistung ändert. Die 190°C Temperatureinstellung weist eine höhere Antriebsleistung als die 225°C Einstellung auf. Die ausführlichen Gründe werden im kommenden Kapitel der Analyse diskutiert. Die Messungen werden zur Verifizierung mehrfach wiederholt. Die Unterschiede mit und ohne Isolierung sind bei diesen beiden Temperatureinstellungen identisch.

### 9.2.3. Änderung der Heizungstemperatur, Einspritz- und Plastifizierarbeit

Die Ergebnisse der Einspritzarbeit bei Material PE1800H mit unterschiedlichen Heiztemperaturen zeigen einerseits in der elektrischen Einspritzarbeit eine starke Veränderung um 10% Anstieg wenn die Temperatur reduziert wird. Bei der Förderarbeit der Pumpen findet eine Veränderung statt, ebenfalls mit beinahe 10%. Die Leckölmengen werden mit steigender Temperatur auch um fast 5% kleiner. Der Wärmestrom der Haltepumpe ist sehr gering und daher in der Abbildung nicht vorhanden. Die Konvektion der Pumpe ins Öl ändert sich nur wenig. Die Wärmearbeit der Pumpen fällt stark um ca. 35%. Der Grund wird in der Analyse erläutert werden. Zum Schluss ist noch erwähnenswert, dass die hydraulische und die spezifische Einspritzarbeit beide mit steigender Heiztemperatur geringer werden.

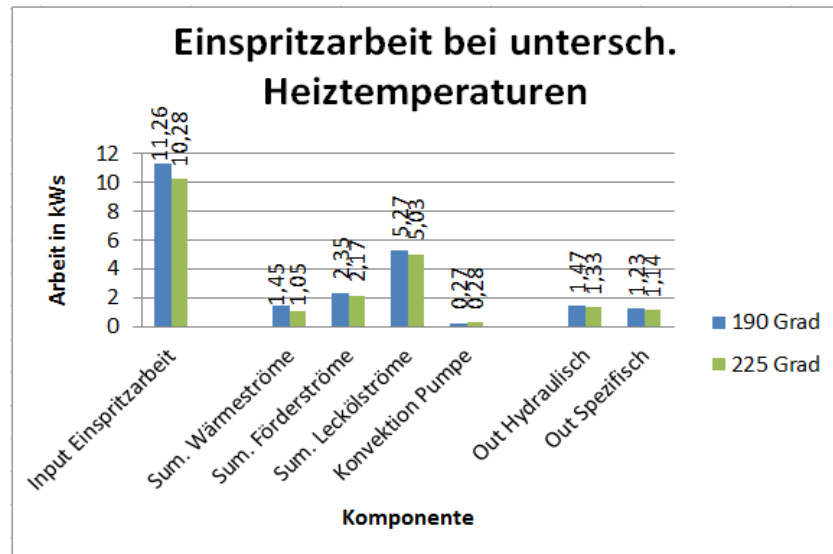


Abbildung 91: Ergebnisse Einspritzarbeit bei Heizungstemperaturänderung

Die elektrische Plastifizierarbeit verhält sich bei den Heiztemperaturänderungen ähnlich der elektrischen Einspritzarbeit und nimmt mit steigender Temperatur ab. Die eigentliche Einspritzarbeit der Regelpumpe (Förderarbeit s.o.) ist die stärkste Komponente und sinkt mit steigender Temperatur. Die Leckölströme verändern sich in diesem Falle ebenfalls etwas. Es folgen die Konvektion der Pumpe ins Öl und die Haltepumpe (Förderarbeit), dort sind ebenfalls fast keine Änderungen vorhanden. Die hydraulische Plastifizierarbeit, das eigentlich Gewollte, welches aus der Bilanz als Arbeit wieder austritt, ist bei 190°C Heiztemperatur größer. Die Plastifizierarbeit verringert sich bei steigender Heiztemperatur im 225°C Versuch um ca. 10%. Ebenso fällt auch die Förderarbeit der Regelpumpe bei steigender Temperatur um 10%. Details sind dem Anhang unter 13.10, S.216 in der Übersichtstabelle zu entnehmen.

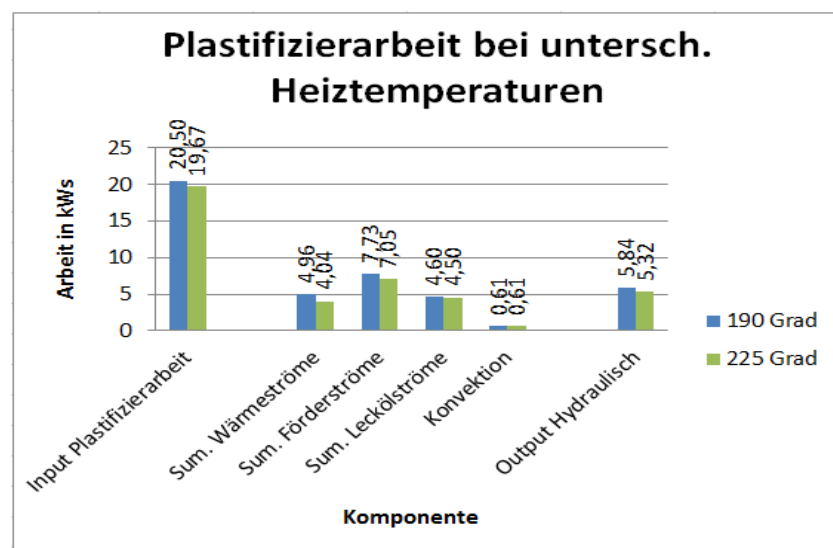


Abbildung 92: Ergebnisse Plastifizierarbeit bei unterschiedlichen Heizungstemperaturen

#### 9.2.4. Shell Tellus S2 Änderung der Heiztemperatur nach Spülung (Wiederholversuch)

Zur Vorbereitung der Verwendung eines neuen Öls werden die Ergebnisse nach dem Öltausch von dem alten Shell Tellus S2 zum neuen Shell Tellus S2 erneut aufgenommen und auch nun bei unterschiedlichen Heizungstemperaturen gefahren. Die Ergebnisse sind wie auch im einführenden Versuch (Seite 125, Tabelle 24) mit 215°C Heiztemperatur (an der Düse!) fast identisch und sprechen für ein korrektes Aufnahmesystem.

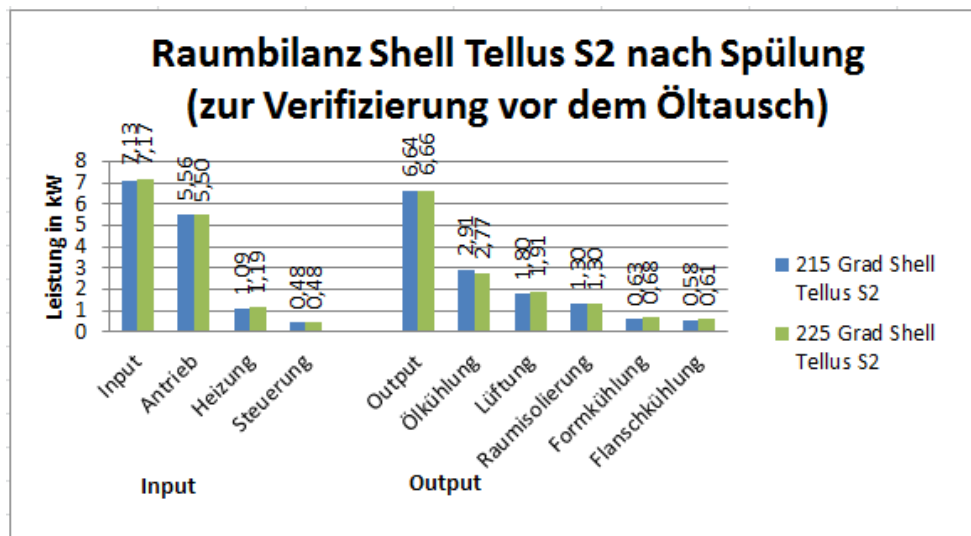


Abbildung 93: Ergebnisse Ölsplung mit Standardöl Tellus 46

Auffällig wieder die Leistungssteigerung der Raulüftung bei 225°C um ca. 100W. Ebenso verändert sich die Heizleistung um ca. 100W. Gegenüber der Einstellung mit 190°C (mit 380W Leistungssteigerung auf Seite 136) ist hier nur eine leichte Steigerung der Heizleistung zu beobachten. Die Werte sind wieder über einen Zyklus gemittelt. Auf den Einfluss der Ölkühlung wird in der Diskussion gesprochen werden.

#### 9.2.5. Shell Tellus S2 Änderung der Öltemperatur

Die Änderung der Öltemperatur mit dem Standard-Öl Shell Tellus S2 bewirkt folgende Ergebnisse: Mit steigender Öltemperatur steigt auch die Einspritzarbeit. Der Temperaturversuch wird ab einer Öltemperatur von 45°C Standardtemperatur gefahren und durch eine Änderung des Durchflusses der Ölkühlung ist die steigende Kurve der Öltemperatur bis ca. 56°C erreicht. Die Einspritzarbeit steigt mit der steigenden Öltemperatur. Der Grund wird in der Analyse erläutert. Der Versuch wird nach dem Erreichen der hohen Temperatur abgebrochen um weitere Maschinenprobleme zu verhindern. Aus diesem Grund stehen keine weiteren Ergebnisse zur Verfügung.

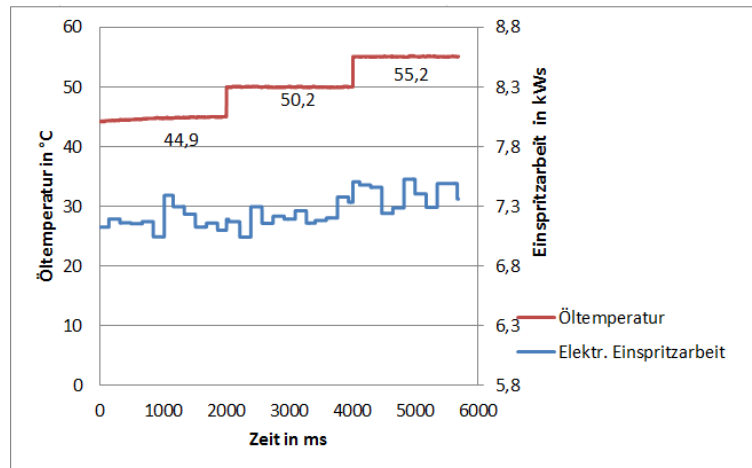


Abbildung 94: Ergebnisse Einspritzarbeit mit Tellus S2

Bei der Plastifizierarbeit wird der Öltemperaturverlauf ähnlich dem Kurvenverlauf bei der Einspritzarbeit durch eine Änderung des Ölkühlungsdurchflusses hervorgerufen. Wird die Öltemperatur erhöht, steigt aber im Gegensatz zur Einspritzarbeit hier die Plastifizierarbeit sofort an und bildet einen konstanteren Verlauf. Wird die Öltemperatur darauf wieder erhöht, steigt die Arbeit sofort wieder um einen Offset von 0,5kW und nimmt den konstanteren Verlauf an. Die Arbeit sinkt ganz leicht im Laufe der Zeit nach der Temperaturerhöhung. Die Schwankungen der Plastifizierarbeit sind kleiner als bei der Einspritzarbeit.<sup>31</sup>

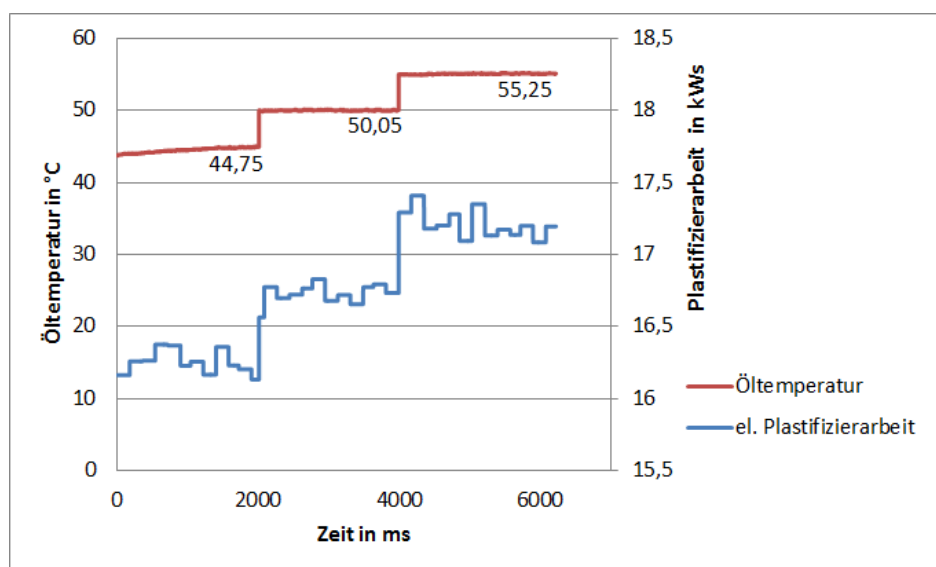


Abbildung 95: Ergebnisse Plastifizierarbeit mit Tellus S2

<sup>31</sup> Leider ist es wegen der großen Menge an Daten nicht möglich eine Ausgleichsfunktion durch die Werte zu ziehen. Der generell steigende Verlauf der Einspritzarbeit und sinkende Verlauf der Plastifizierarbeit nach jeder Temperaturerhöhung ist aber sichtbar. Die Werte werden alle 500ms aufgenommen. Auf der x-Achse sind daher Millisekunden als Zeiteinheit aufgezeichnet. Die Aufnahmedauer beträgt ca. 4 Stunden. Diese lange Aufnahmedauer ist notwendig, um die Öltemperaturänderungen durch die doch träge Ölkühlung durchrühren zu können. Die Einstellung am Durchfluss wirkt sich erst später auf die Öltemperatur aus. Die Gründe werden in der Analyse angesprochen.



### 9.2.6. Änderung auf Shell S4, Raumbilanz

Die Änderung auf ein anderes Hydrauliköl Shell Tellus S4 bringt eine Veränderung der Antriebsleistung mit sich. Diese sinkt um 3,5% von 5,55kW auf 5,38kW. Leichte Abweichungen sind in der Form- und Ölkühlung zu erkennen. Diese werden in der Parametertabelle der Diskussion erläutert. Demnach sinkt natürlich die Inputkomponente um die für die Antriebsleistung verringernde Differenz. Der Output sinkt ebenso um einen kleinen Betrag von 20Watt. Wegen dem Einfluss der Kühlleistungen aber weniger als der Leistungsinput.

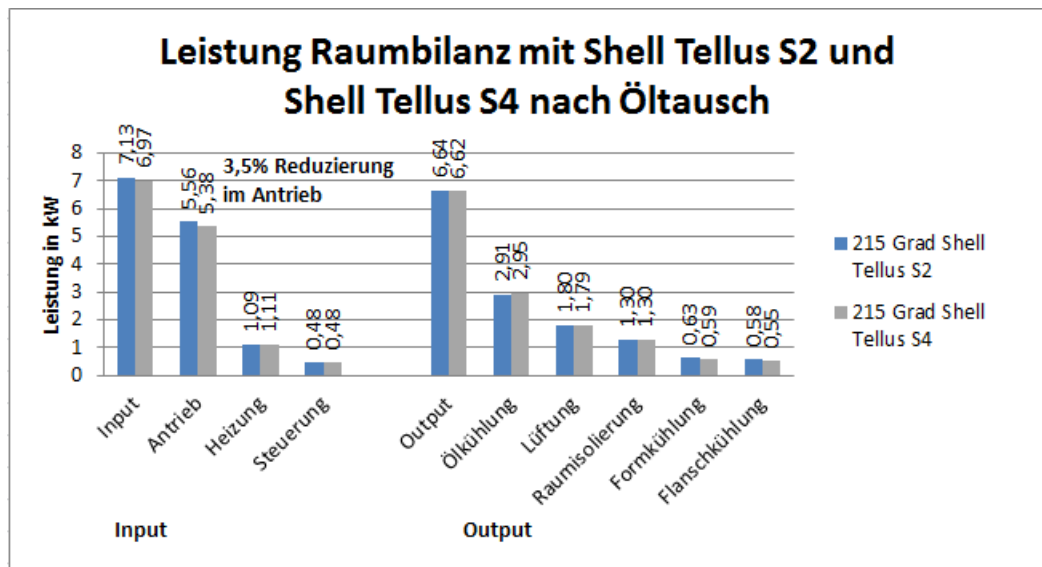


Abbildung 96: Ergebnisse Raumbilanz nach Öлтаusch Tellus S4

### 9.2.7. Shell S4, Änderung der Öltemperatur

Mit der Änderung der Öltemperatur durch das neue Shell Tellus S4 werden folgende Ergebnisse aufgenommen: Wie beim Shell Tellus S2 steigt mit der Öltemperaturerhöhung auch die Einspritzarbeit. Jedoch steigt diese nur sehr leicht an. Der Temperaturversuch wird ab einer Öltemperatur von 45°C Standardtemperatur gefahren und durch eine Änderung des Durchflusses der Ölkühlung ist die steigende Kurve der Öltemperatur bis ca. 56°C erreicht. Die Einspritzarbeit schwankt weniger als das vorherige S2 Öl um einen gewissen Wert beim Steigen. Der Grund wird in der Analyse erläutert. Der Versuch wird nach dem Erreichen der 55°C Temperatur abgebrochen um weitere Maschinenprobleme zu verhindern. Aus diesem Grund stehen keine weiteren Ergebnisse zur Verfügung.

Beim Tellus S2 im Grundzustand erhöht sich mit der Temperaturerhöhung die elektrische Einspritzarbeit um 3%. Beim Tellus S4 dagegen sind nur 1,5% Erhöhung zu messen. Die Parametertabelle im Anhang S.214f. zeigt das Steigen der Arbeitsgrößen.

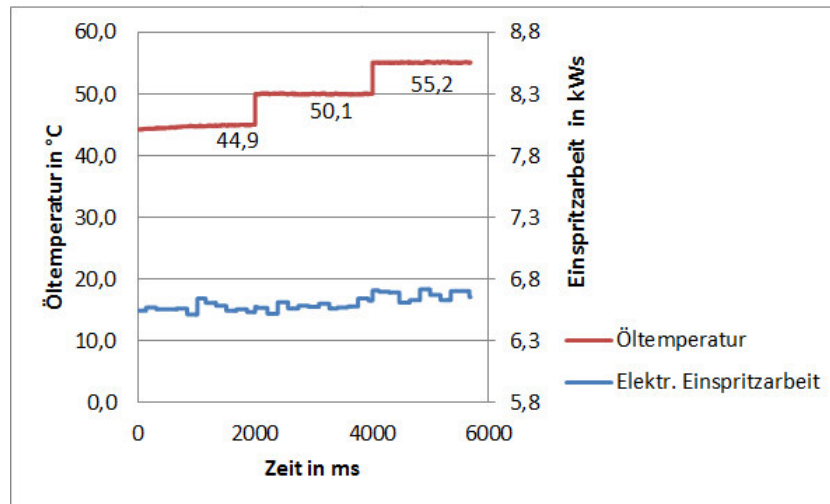


Abbildung 97: Ergebnisse Einspritzarbeit nach Öлтаusch Tellus S4

Bei der Plastifizierarbeit mit dem neuen Shell Tellus S4 werden ebenso die drei unterschiedlichen Öltemperaturen 45, 50 und 55°C gefahren. Wird die Öltemperatur erhöht, wächst aber hier im Gegensatz zur Einspritzarbeit die Plastifizierarbeit nicht sofort an sondern verringert sich zu erst. Die Verringerung wird hier nur ein kleines Stück auf 50°C gefahren. Wird die Öltemperatur darauf weiter erhöht, sinkt die Plastifizierarbeit bis zu einem gewissen Punkt weiter und sinkt dann kontinuierlich. Durch die hohen Schwankungen ist eine genauere Betrachtung erforderlich, die den sinkenden Verlauf noch besser erkennen lässt. D.h. bei der höchsten Öltemperatur von 55°C ist bei der Plastifizierarbeit wieder ein Anteigen zu erkennen. Wird diese maximale Temperatur von 55°C gehalten, ist wieder wie beim Tellus S2 ein leichtes Sinken zu erkennen. Die Aufnahmedauer beträgt auch hier ca. 4 Stunden. Diese lange Aufnahmedauer ist wieder notwendig wegen der trägen Öltemperaturänderung. Auch hier wirkt die Einstellung am Durchfluss erst später auf die Öltemperatur. Gegenüber 45°C Öltemperatur.

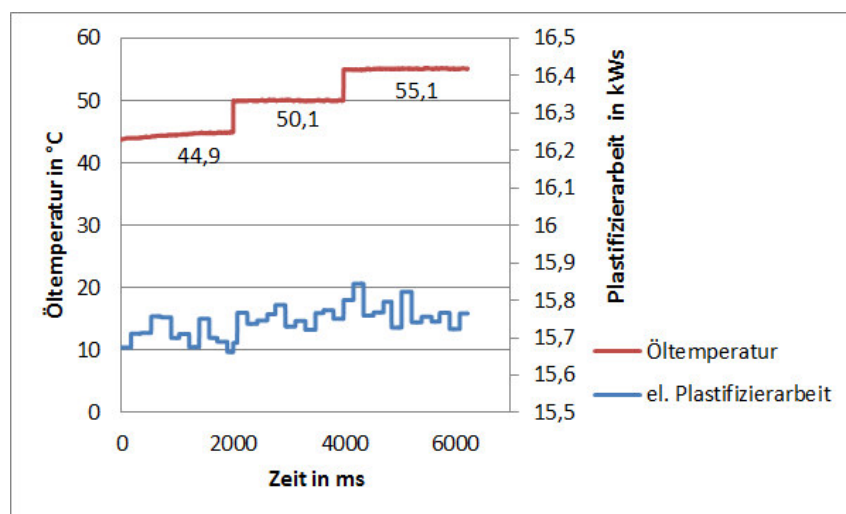


Abbildung 98: Ergebnisse Plastifizierarbeit nach Öлтаusch Tellus S4

### 9.2.8. Änderung auf Mobil DTE10 Excel, Raumbilanz

Die Änderung auf Mobil DTE10 Excel hat ähnliche Auswirkungen und Unterschiede wie die Umstellung auf das Shell Tellus S4 Öl im vorherigen Versuch. Die Antriebsleistung mit DTE10 EXCEL befindet sich auf ähnlichem Niveau wie bei Tellus S4. Auf die Änderung der Lüftungsleistung, der Heizleistung und der Kühlleistung wird wegen der sich ändernden Umwelteinflüsse kein Schwerpunkt gelegt.<sup>32</sup> Die Verminderung der Antriebsleistung ggü. dem Istzustand beträgt hier ca. 2,8%.

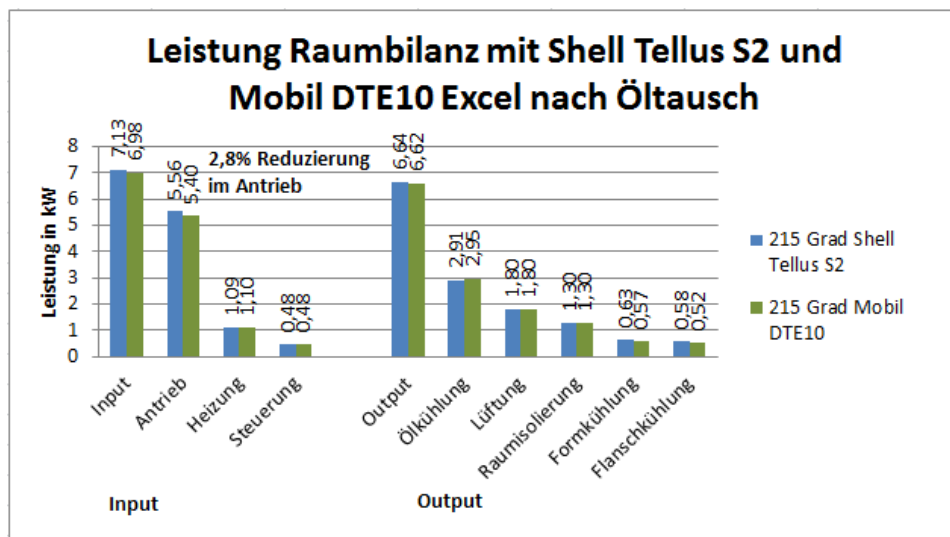


Abbildung 99: Ergebnisse Raumbilanz nach Öлтаusch Mobil DTE10 Excel

### 9.2.9. Mobil DTE10 Excel, Änderung der Öltemperatur

Mit der Änderung der Öltemperatur bei dem neuen Mobil DTE10 EXEL werden folgende Ergebnisse aufgenommen: Wieder wie beim Shell Tellus S4 wird die Einspritzarbeit bei der Öltemperaturerhöhung beobachtet. Der Temperaturversuch wird auch hier ab einer Öltemperatur von 45°C Standardtemperatur gefahren.<sup>33</sup> Die Einspritzarbeit steigt hier im Gegensatz zum Shell Tellus S4 mit der Öltemperaturerhöhung wieder etwas an. Der Grund wird in der Analyse erläutert. Der Versuch wird nach dem Erreichen der nun höchsten gemessenen Temperatur (auch hier von ca. 55,5°C) in dieser Versuchsreihe zum Schutz des Hydrauliksystems beendet. Aus diesem Grund stehen auch hier keine weiteren Ergebnisse zur Verfügung. Die Schwankungen der Einspritzarbeit sind auch hier gegenüber dem Grundzustand mit Shell Tellus S2 geringer. Einen größeren Sprung der Arbeit zu

<sup>32</sup> Für die Kühlwasserleistung ist der Zeitpunkt der Messung entscheidend, inwiefern sich die Kühlleistung auf die Maschine eingeregelt hat. Die Leistung erscheint bei der zweiten Messung höher, dieses ist aber auf einen höheren Durchfluss zurückzuführen. Die Kühlleistung wird sich zu einem späteren Zeitpunkt wieder auf einen neuen Wert in der 215°C Messung einregeln.

<sup>33</sup> Es wird hier ebenfalls versucht eine Temperatur von über 60°C zu erreichen. Diese kann jedoch aufgrund der Maschineneinstellung und deren Schutzmechanismen nicht erreicht werden. Der Durchfluss in der Ölkühlung wird daher sehr gering gefahren (fast keinen Wasserdurchfluss mehr).

7kWs findet laut Aufzeichnung erst ab 55°C statt. Hier ist zu 45°C eine Zunahme der Arbeit von 2,2% erreicht. Die Arbeitswerte bewegen sich aber ggü. dem S2 Öl auf einem niedrigeren Niveau.

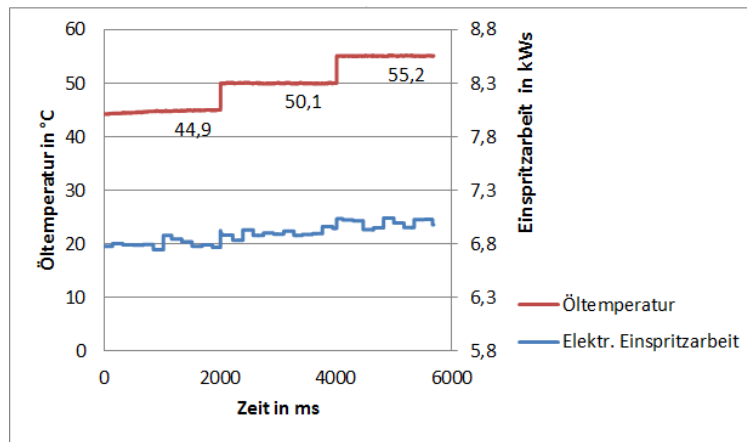


Abbildung 100: Ergebnisse Einspritzarbeit bei Öltausch Mobil DTE10 Excel

Bei der Plastifizierarbeit mit dem Mobil DTE10 EXCEL wird der Öltemperaturverlauf ähnlich dem Kurvenverlauf beim Shell Tellus S2 beobachtet. Die Vergrößerung der Plastifizierarbeit ist auf die Erhöhung der Öltemperatur im Bereich von 45°C bis 55°C wie beim Tellus S2 zurückzuführen. Die Plastifizierarbeit sinkt vorerst stetig weiter. Bei einer Öltemperatur von 50°C erfolgt eine leichte Steigung der Plastifizierarbeit und diese schwankt darauf im Laufe der Zeit.<sup>34</sup> Die Schwankungen von Zyklus zu Zyklus sind generell bei beiden Energieeinsparölen nicht in so einem gravierenden Umfang festzustellen, wie bei den vorherigen Versuchsreihen mit dem Tellus S2 Standardöl.

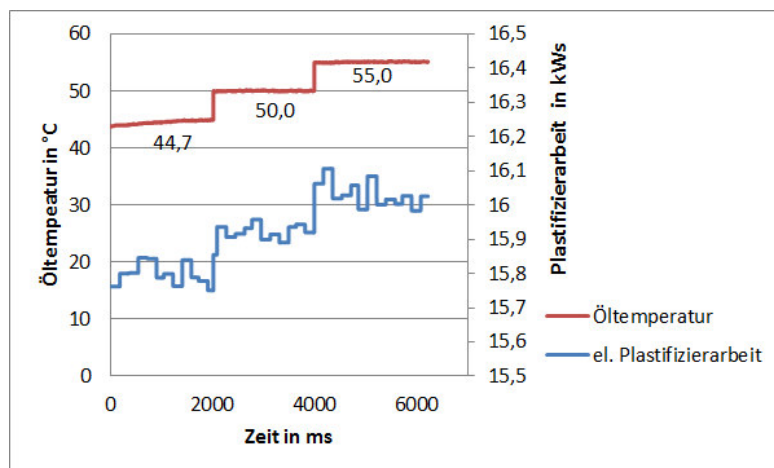


Abbildung 101: Ergebnisse Plastifizierarbeit bei Öltausch Mobil DTE10 Excel

<sup>34</sup> Das Sinken ist auf Grund der Schwankungen der Produktionszyklen (Maschinenbedingt) schwer zu erkennen. Dadurch ergeben sich unregelmäßige Aufnahmen der Zyklen. In der Diskussion werden im letzten Teil Messprobleme und deren Lösungen beschrieben.

### 9.2.10. Übersicht, Einspritzarbeit und Plastifizierarbeit bei unterschiedlichen Ölen

Werden die Einspritz- und die Plastifiziervorgänge in zusammenfassender Übersicht mit allen drei Ölen verglichen, sind die Lecköl-Wärmeströme der Pumpen in Summe, die Wärmeströme der Pumpen und auch die Förderströme veränderten Ergebnisse. Die Leckölströme sind bei dem Shell Tellus S2 Öl am größten und bei dem Shell Tellus S4 am geringsten. Die Förderströme der Pumpen sind beim Shell Tellus S2 Öl am höchsten. Das Shell Tellus S4 weist wie auch das Mobil Öl kleinere Förderströme der Pumpen auf. Die Wärmeströme des Pumpensystems sinken nur leicht bedingt durch die leicht ansteigenden Durchflussmengen. Die Gründe werden in der Analyse näher betrachtet.

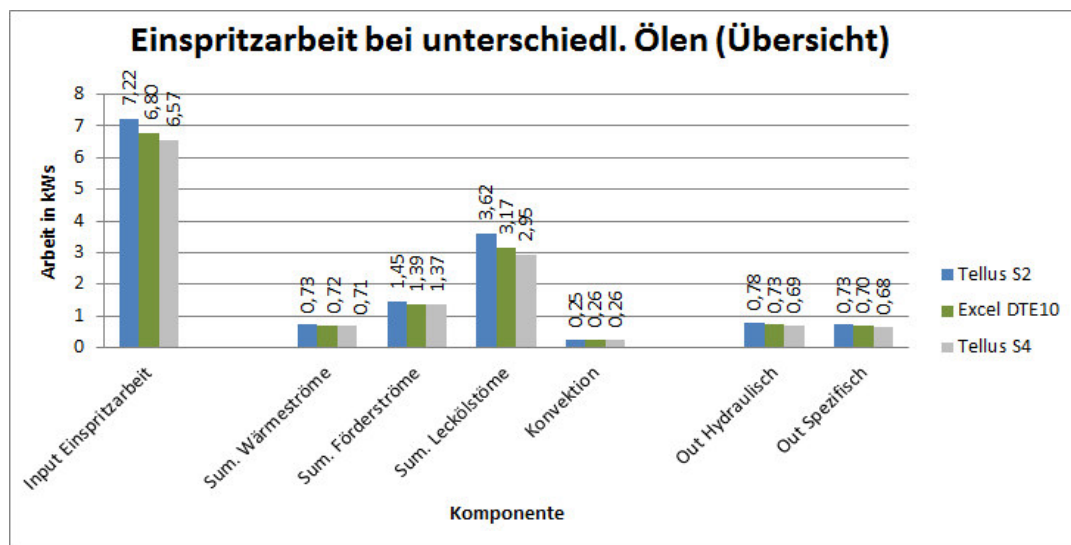


Abbildung 102: Ergebnisse Vergleich Einspritzen Öltausch, Übersicht

Der Bilanzoutput ist bei dem Shell Tellus S2 Öl am geringsten. Das Sinken der Outputgröße ist bei beiden Energieeinsparölen sowohl im hydraulischen System, als auch spezifisch vorne an der Düse zu erkennen, dort sind die Unterschiede aber nicht so gravierend zu erkennen.

Die Förderströme der Pumpen und ihre Leckölströme verhalten sich beim Plastifizieren gegenüber dem Einspritzen ähnlich. Es findet sogar ein kleinerer Wärmestromtransport ggü. dem Einspritzen beim Shell Tellus S4 und beim Mobil DTE10 statt. Die Versuche weisen die geringste Leckölmengen beim Shell Tellus S4 auf. Das Shell Tellus S2 weist wie auch beim Einspritzen höhere Leckölmengen der Regelpumpe und auch der Haltepumpe (in gewissem Maße) auf. Die Förderströme in den Druckleitungen sind hier bei den neuen Energieeinsparölen geringer.

Leichte Unterschiede sind beim Bilanzoutput, der eigentlich gewollten hydraulischen Arbeit zu erkennen. Die Ausgangsenergie sinkt. Dieses ist beim Plastifizieren genauso wie beim o.g. Einspritzen unter Verwendung der neuen energieeinsparenden Öle sichtbar der Fall. Bei beiden Vorgängen sinkt auch die elektrisch eingebrachte Energie ebenso um einen gewissen Teil.

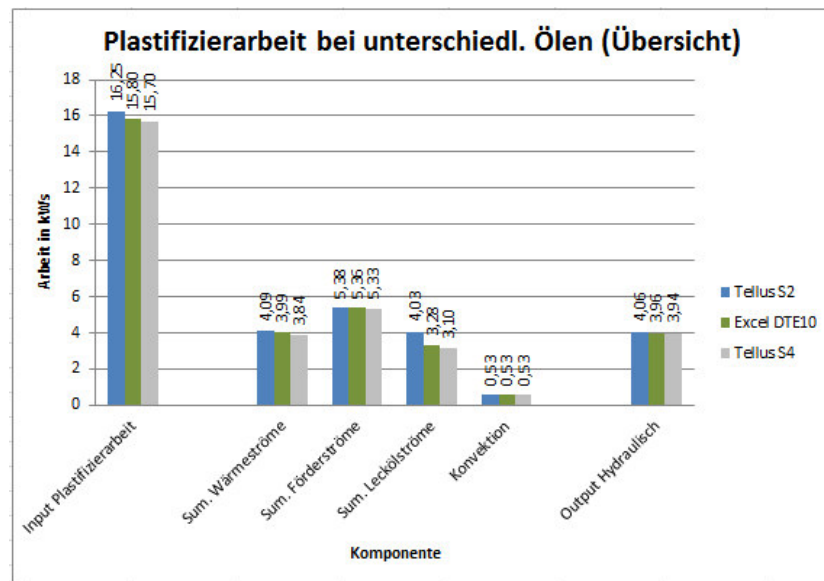


Abbildung 103: Ergebnisse Vergleich Plastifizieren Öltausch, Übersicht

Werden die mittleren Leistungen pro Zyklus betrachtet (Abb. 105), liegt der effizienteste Energieverbrauch im Mittelwert über der Zeit bei dem Shell Tellus S4 Öl mit 5,38kW vor. Anschließend folgt an zweiter Stelle das Mobil DTE10 EXCEL mit 5,40kW. Das ist eine Leistungsminderung von ca. 2,8% bis 3,5%. Die mittlere Antriebsleistung mit 5,55kW bei dem Shell Tellus S2 ist höher als bei den anderen beiden. Die mittlere Leistung des Antriebs sinkt bei allen Ölen mit einer höheren Heiztemperatur von 225°C, jedoch wirkt sich das Sinken durch eine höhere mittlere Heizleistung nicht auf die gesamte Summe aus. Abbildung 104 zeigt die Leistungen im regulären Betrieb bei 215°C Heizungstemperatur. Die Erhöhung auf 225°C mindert letztendlich wegen o.g. Gründe den Energieeinspareffekt.

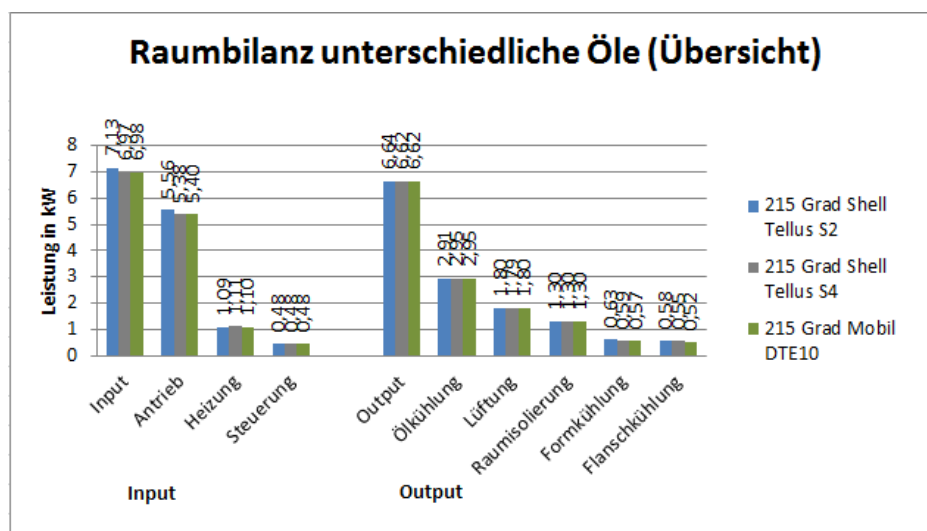


Abbildung 104: Ergebnisse Raumbilanz Öltausch, Übersicht

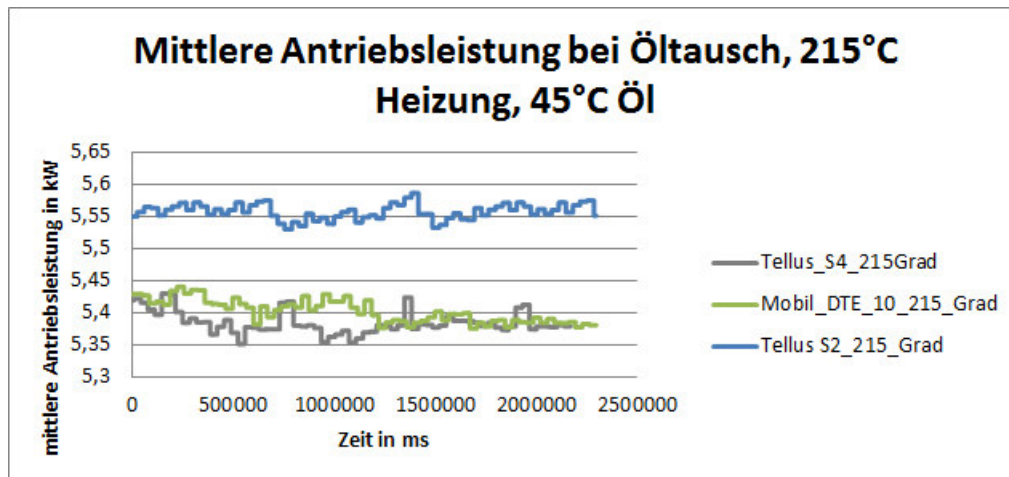


Abbildung 105: Ergebnisse mittlere Antriebsleistung bei Öltausch

### 9.3 Einstellgrößen der Maschine Parameterveränderungen und Auswirkungen auf den elektrischen Energieverbrauch

#### 9.3.1 Veränderung der Kühlzeit

Die Veränderung der Kühlzeit von 25s auf 20s wird schrittweise, wie schon im Durchführungsteil angesprochen, durchgeführt. Die Kühlzeit in s ist grau in der oberen Abbildung eingezeichnet. Mit ihrer Änderung nimmt die Zykluszeit des gesamten Prozesses ab und es steigt die elektrische Leistung des Antriebs etwas an. Die mittlere Heizleistung steigt im letzten Drittel leicht an. In dem SPS-Messsystem werden beide Leistungen in dem Baustein Bilanzrechnung miteinander summiert. Die mittlere Gesamtleistung pro Zyklus weist demnach auch einen leicht steigenden Verlauf bis kurz vor dem Ende (der Einstellung 20s) auf. Diese ist in der grünen Kurve dargestellt.

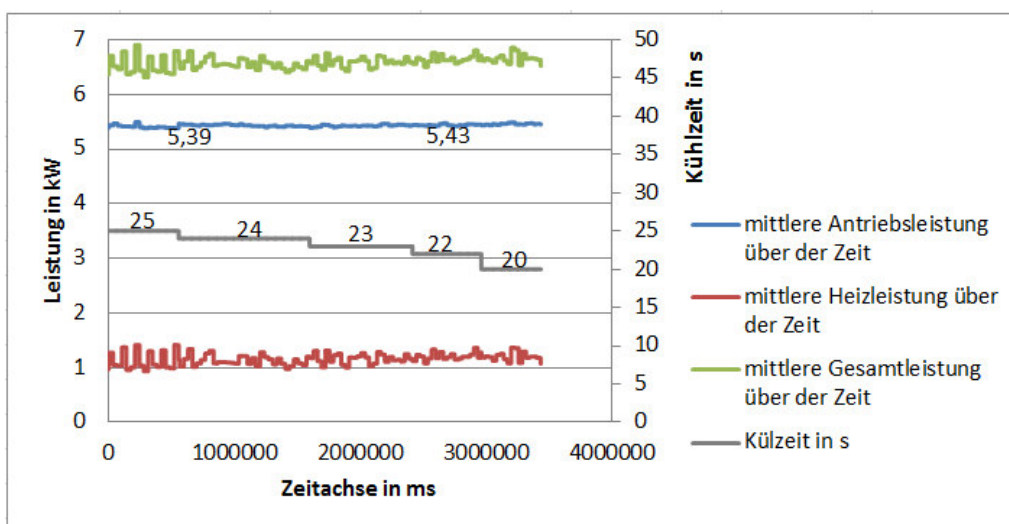


Abbildung 106: Ergebnisse Kühlzeitänderung auf Antriebsleistung



Die mittlere Heizleistung pro Zyklus und die mittlere Gesamtleistung pro Zyklus weisen Schwankungen auf. Diese sind wegen der unterschiedlichen Taktung der Heizung zu messen, denn die mittlere Gesamtleistung übernimmt demnach die Schwankungen der mittleren Heizleistung. Genaue Ursachen werden im nachfolgenden Kapitel der Analyse diskutiert. Probeweise werden auch kleinere Kühlzeiten gefahren, jedoch wegen Ausschussteilen kann Maschinenfähigkeit nur bis 20s Kühlzeit festgestellt werden. Die Reduzierung der Kühlzeit wird in Beobachtung mit den produzierenden Teilen vorgenommen. Die Teile werden gemessen und gewogen um keine durch eine zu kurze Kühlzeit Ausschuss-Produkte herzustellen. Messergebnisse und eine Beschreibung der Messung der Teile ist im Anhang unter 13.14, S.224ff. dargestellt. Die Produkte werden anschließend von der Qualitätssicherung erneut überprüft. Die genauen Daten des Produktes sind dem Katalog der Firma zu entnehmen.

### 9.3.2 Veränderung des Zuhaltekraft

Die Veränderung des Zuhaltedrucks bewirkt eine Änderung der Zuhaltekraft. Deshalb wird vom Maschinenhersteller, wie im Versuchsteil beschreiben, von einer Veränderung der „Zuhaltekraft in bar“ gesprochen. Diese Versuchsreihe dient, wie schon in der Versuchsdurchführung erwähnt, der Untersuchung und Beeinflussung der Leistungsspitzen.<sup>35</sup> Die Schließkraft wird, wie unter Punkt 8.5.2 beschrieben, geändert. Dabei ist eine Verringerung der Leistungsspitzen um jeweils 2,5kW zu erkennen. Insgesamt lassen sich die Leistungsspitzen im Mittelwert von ca. 35kW auf 25kW verringern (ca. 25%). Dafür ist eine Reduzierung des Schließdrucks (Schließkraft) von 110 bar auf 50bar notwendig. Diese wird wie schon beschrieben, in 20bar-Schritten reduziert.

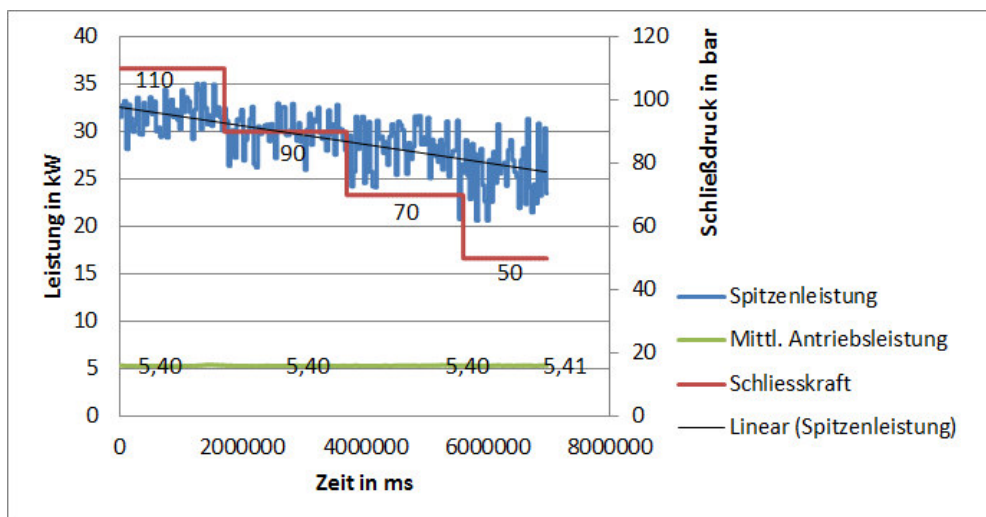


Abbildung 107: Ergebnisse Schließkraftänderung auf Antriebsleistung

<sup>35</sup> Die Ergebnisse werden aus dem beschriebenen SPS-Maximum-Funktionsbaustein ausgewertet. Die aktuelle Antriebsleistung wird auf den Funktionsbaustein „Max\_Wert“ gegeben und die im obigen Diagramm aufgeführte blaue Kurve wird vom System aufgenommen.



Wird die mittlere Antriebsleistung betrachtet, ist keine Veränderung über die Schließkraftreduzierung erkennbar. Sie bleibt konstant zwischen 5,40 bzw. 5,41kW mittlerer Leistung stehen. Die Leistungsmessung wird über das ZES-System vorgenommen. Es werden demnach alle Schwankungen über die Variable „ $P_{ges}$ “ berücksichtigt. Sichtbar machen sich diese Schwankungen in der blauen Kurve und das ständige Wechseln von unten nach oben und wieder nach unten.

Die Versuchsreihe wird über einen Zeitraum ca. 2 Stunden durchgeführt. Nach jeder Druckänderung ist der Reduzierungsvorgang der eigentlichen Kraft sofort abgeschlossen und keine weitere Änderung zu beobachten. Bei konstanter Schließkraft bleiben die Leistungsspitzen in ihrem Wechsel auf konstanter Höhe und streuen um einen Mittelwert. Erst bei weiterer Reduzierung kommt es zu einer Senkung und anschließend wieder zu einem konstanten Verlauf.

#### 9.4 Veränderung des Durchflusses der Formkühlung und Auswirkung auf den thermischen Energieverbrauch

Die Veränderung des Durchflusses der Flanschkühlung ist der letzte durchgeführte Versuch. Die Durchflussänderung erfolgt in 1l/min Schritten (blaue Linie). Dabei erhöht sich die Temperatur (rote Linie) des Flansches erst langsam, bis sie sich einer gedachten Tangente annähert.

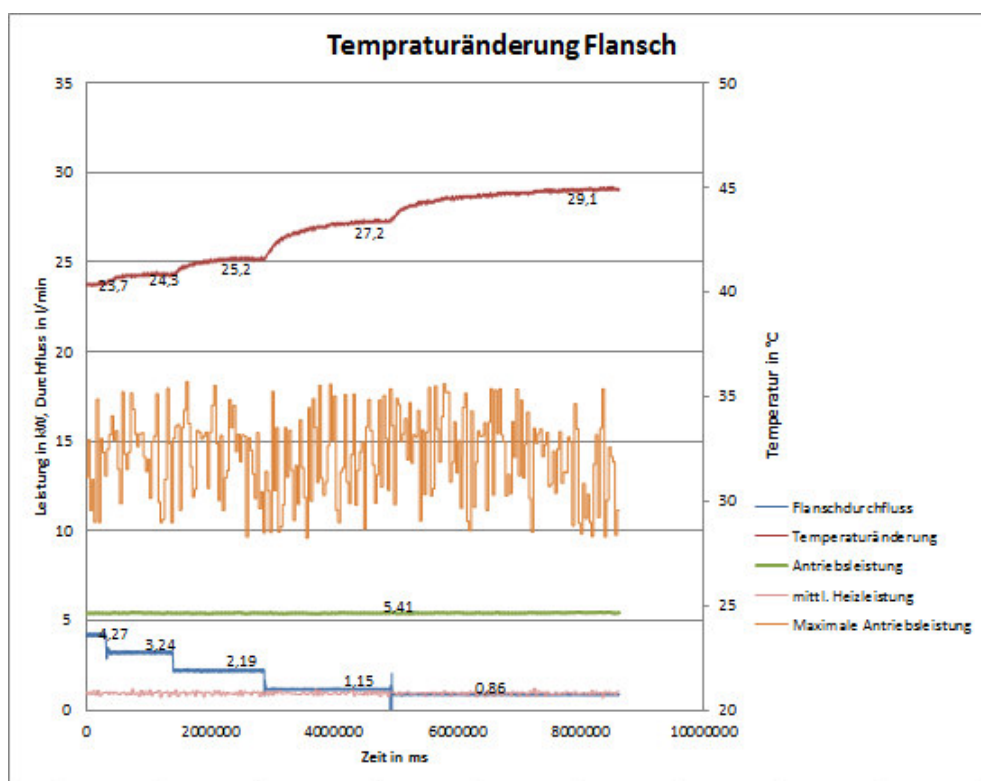


Abbildung 108: Ergebnisse Durchflussänderung Flansch auf Temperatur

Die Temperaturänderung beträgt erst 0,8 bis 1°C, von ca. 24,4°C bis 25,2°C. Wird der Flanschkühlungsdurchfluss weiter um 1l/min reduziert, wird eine höhere Temperatursteigerung erreicht auf 27,3°C. Die Differenz vergrößert sich damit auf 2°C. Bei der nächsten Erhöhung werden 29,1°C erreicht. Die mittlere Heizleistung, die mittlere Antriebsleistung und die maximale Antriebsleistung bleiben unverändert. Lediglich die Häufigkeit der Leistungsspitzen verändert sich etwas, wobei die Leistungsspitzen im mittleren Bereich der Aufnahme bei der Reduzierung von 1,15l/min auf 0,8l/min am größten ist. Der Mittelwert der Schwankung verlagert sich weiter nach oben, kehrt dann aber bei weiterer Durchflussreduzierung wieder nach unten zurück.

## 9.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Werden die Ergebnisse der Raumbilanz aller drei Öle miteinander verglichen, können folgende Aussagen getroffen werden:

- Bei den Raumbilanzen werden bis auf kleinere Abweichungen von 3 bis 5% die Inputgrößen von den Outputgrößen gedeckt.
- Bei der Verwendung der neuen Öle treten Unterschiede in der elektrischen Leistung des Antriebes auf. Es kann hier Antriebsenergie eingespart werden. Daraus ergibt sich eine resultierende kleinere mittlere Inputleistung, welche sich unter Umständen im zeitlichen Verlauf bei Verwendung der neuen Öle amortisieren könnte!

*Der mittlere Leistungsinput ist in Summe nicht immer so stark wie erwartet, da auch andere Inputkomponenten (wie Heizleistung) Einfluss auf die Inputgröße haben. Bei dem Einsatz der neuen Öle S4 und DTE10 ist der größte Sinkanteil auf die verminderte Antriebsleistung zurückzuführen.*

- Unterschiede treten außerdem bei der Erhöhung der Öltemperatur auf. Bei dem Standard-Öl Tellus S2 erhöht sich die Leistung sehr stark, bei den Energieeinsparölen eher weniger.

Werden die Ergebnisse der Prozessbilanzen miteinander verglichen, können die Aussagen der Raumbilanzen durch die Messung einzelner Energieströme untermauert werden. Die Leckölmenge sowie die Wärmeströme in den Förderleistungen minimieren sich mit der Verkleinerung der o.g. mittleren elektrischen Leistung bei der Verwendung der neuen Energieeinsparöle. Ebenso verkleinert sich der Bilanzoutput beider Teilprozesse.

In den beiden abschließenden Versuchen ist es möglich, eine Reduzierung der Leistungsspitzen durch Veränderung des Zuhaltedrucks und eine Erhöhung der Produktions-Ausbringungsmenge durch eine Reduzierung der Kühlzeit zu erreichen.

## 10 Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ursachen für die im vorherigen Abschnitt der Arbeit vorgestellten Ergebnisse besprochen. Angefangen von den Ursachen der Raumbilanz werden die Prozessbilanzen für das Einspritzen und Plastifizieren dargestellt. Hierbei spielen die einzeln gemessenen Temperatur und Druckwerte eine Rolle. Für die Berechnung der Leistungs- und Arbeitswerte nach dem manuellen Verfahren werden diese extra aufgenommen und anschließend werden diese mit den Werten der automatisierten Messmethode verglichen. Es folgt eine Plausibilitätsprüfung, bei der die Höhe der Abweichungen betrachtet und begründet wird. Schließlich endet die Diskussion mit einer Betrachtung und Begründung der Deckungsanteile der Prozessbilanzen.

### 10.1 Veränderungen im Grundzustand

#### 10.1.1 Auswirkungen von Heizungstemperaturänderung

Die Änderung der Heiztemperatur hat die Auswirkung, dass die Raumlüftungsleistung und die elektrische Leistung für die Heizung sinken, die Heiztemperatur wird vom Ausgangszustand 215°C auf 190°C gesenkt (bei der Verwendung von Polypropylen PE1800H). Die Antriebsleistung (mittlere Leistung pro Zyklus) vergrößert sich etwas um ca. 0,5%, durch zwei weitere Messungen bestätigt.

Bei einer Temperaturerhöhung auf 225°C steigen Raumlüftungsleistung und die benötigte mittlere Heizleistung. Die Antriebsleistung sinkt dagegen um ca. 1,2%. Die Tabelle zeigt eine kurze Übersicht über die Größenordnung der Veränderung.

Bilanz Raummessung	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Lüftung in kW	Raum- isolierung in kW	Heizung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Materialtausch PE1800H	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,06	5,60	0,48	7,14	6,76	95%
Senkung der Heiztemperatur 190°C	2,85	0,61	0,51	1,62	1,30	0,82	5,63	0,48	6,93	6,38	92%
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	2,68	0,61	0,57	1,94	1,30	1,16	5,53	0,48	7,17	6,52	91%

Tabelle 26: Analyse Parametertabelle Raumleistungen

Wird die Einspritzarbeit näher betrachtet, fällt eine Veränderung der Förderarbeit der Regelpumpe auf. Diese fällt von 1,71kW bei 215°C auf 1,65kW bei 225°C. Der Wärmestrom sinkt aber leicht von 1,42kW bei 190°C Heizungstemperatur auf 1,01kW bei 225°C Heizungstemperatur. Die elektrische Einspritzarbeit fällt von 11,26kW auf 10,28kW von 190°C auf 225°C Heizungstemperatur. Demzufolge

fällt die Gesamtarbeit (Summe Input) von 10,74kWs auf 10,28kWs bei Temperaturerhöhung um ca. 4%. Bei Temperatursenkung steigt die Arbeit von 10,74kW auf 11,26kWs, ebenfalls ca. 4,5% Differenz. Der Grund liegt im unterschiedlichen Fließverhalten [26] bei unterschiedlichen Temperaturen (S.161). Die genaue Wertänderung ist nicht Gegenstand der Diskussion. Es wird hier nur auf die Erkenntnis eingegangen, dass eine Änderung messtechnisch erfassbar und laut Literatur erwartet werden kann.

Bilanz Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Förd. Regelp. in kWs	Förd. Haltep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Haltep. in kWs	Lecköl Wärme Regelp. in kWs	Lecköl Wärme Haltep. in kWs	Konvektion Pumpe in kWs	Elektrische Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Hydraulisch in kWs	Spezifisch in kWs	Deckungsanteil
Materialtausch PE1800H	1,71	0,54	1,33	0,04	2,48	2,57	0,29	10,74	10,74	8,95	83%	1,38	1,18	69%
Senkung der Heiztemperatur 190°C	1,81	0,54	1,42	0,04	2,70	2,57	0,27	11,26	11,26	9,35	83%	1,47	1,23	68%
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	1,65	0,54	1,01	0,04	2,48	2,57	0,29	10,28	10,28	8,58	83%	1,33	1,14	69%

Tabelle 27: Analyse Parametertabelle Einspritzarbeit

Die spezifische Einspritzarbeit sinkt ebenfalls von 1,18kWs (215°C) auf 1,14kWs (225°C), das sind ca. 3%. Bedingt durch das Sinken des hydraulischen Anteils auf 1,33kWs vom Ausgangswert 1,38kWs. Bei 190°C steigen beide Größen um ca. 6% auf 1,47kWs hydraulisch und 1,23kWs spezifisch.

Bilanz Plastifizieren	Arbeit											Dosiermotor	
	Förd. Regelp. in kWs	Förd. Haltep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Haltep. in kWs	Lecköl Wärme Regelp. in kWs	Lecköl Wärme Haltep. in kWs	Konvektion Pumpe in kWs	Elektrische Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kWs	Deckungsanteil %
Materialtausch PE1800H	6,75	0,65	4,78	0,17	2,77	1,85	0,61	20,13	20,13	17,58	87%	5,55	82%
Senkung der Heiztemperatur 190°C	7,12	0,65	4,78	0,17	2,77	1,85	0,61	20,50	20,50	17,94	88%	5,84	82%
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	6,62	0,65	4,76	0,17	2,66	1,85	0,61	20,13	20,13	17,32	86%	5,55	84%

Tabelle 28: Analyse Parametertabelle Plastifizierarbeit

Bei der Plastifizierarbeit ist das Sinken und Steigen der Größen bei 225°C und 190°C ebenfalls zu beobachten. Ausgehend von einer Förderarbeit 6,75kWs (215°C) steigt diese um 5% bei 190°C auf 7,12kWs. Die elektrische Plastifizierarbeit steigt um ca. 2,5% auf 20,50kWs (190°C) ausgehend von 20,13kWs (215°C). Die Plastifizierarbeit am Dosiermotor steigt von 5,55kWs (215°C) auf 5,84kWs (190°C). Bei 225°C Heiztemperatur sinken die Größen auf die in Tabelle 28 Mitte gezeigten Werte.

Die Förderarbeit für den Einspritz- und Plastifiziervorgang und die elektrische Einspritz- und Plastifizierarbeit sinken ebenso und auch die Ausgangsgröße, d.h. die eigentliche Plastifizierarbeit.

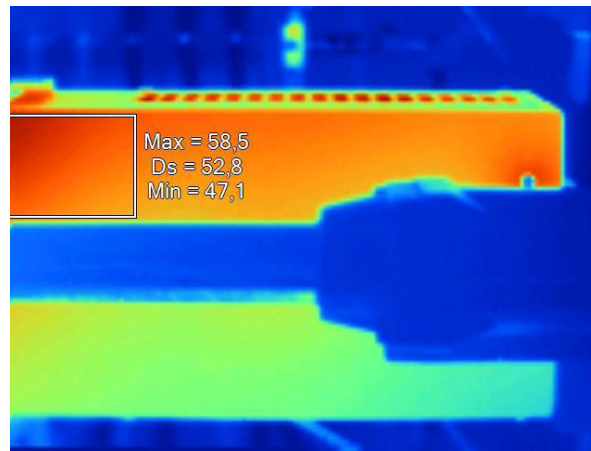


Abbildung 109: Analyse Temperaturverlauf Heizung Grundzustand

Obige Abbildung zeigt eine Infrarotaufnahme der Heizung im Ursprungszustand, ohne Isolierung. Abgebildet ist das Schutzblech auf der Heizung. Die mittlere Temperatur in der wärmsten Zone direkt an der Düse beträgt 52,8°C, mit einem Maximum von 58,5°C. Die Temperatur wird bei dieser Messung auf 215°C an der Düse eingestellt. Die Temperaturen an den anderen Heizbändern betragen 210°C/215°C (wie auch schon in den Versuchsreihen vorher beschrieben). Wird die Heiztemperatur auf 225°C gestellt, steigt die Temperatur im Mittelwert an. 55,8°C werden, also 3°C mehr, werden gemessen. Demzufolge steigen die Lüftungsleistung im Raum und die elektrische Heizleistung an.

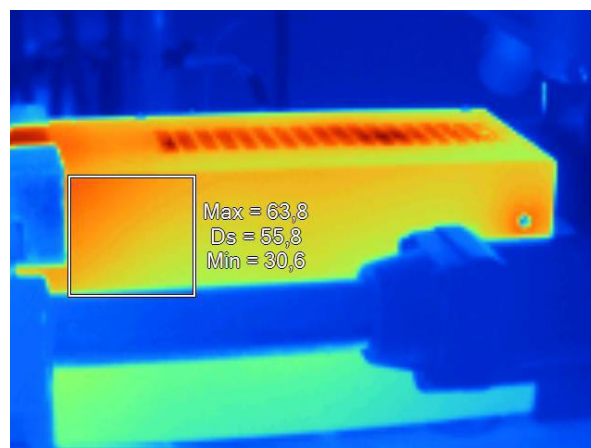


Abbildung 110: Analyse Temperaturverlauf Heizung bei Temperaturerhöhung

Der eigentliche Aufschmelzvorgang kann durch die Formkühlung (Wärmeabnahme) als Gegenpol gesehen werden.

Wärme Input beim Erhitzen / Aufschmelzen		Kühlenergie	
Schussgew	19,4 <sup>37</sup> g	Schussgew	19,4 g
Zykluszeit	35 <sup>37</sup> s	Zykluszeit	35 s
°M	0,000554 kg/s	°M	0,000554 kg/s
cp	1,7 <sup>38</sup> kJ/kg/K	cp	1,7 kJ/kg/K
teta 1	260 <sup>37</sup> °C	teta 1	43,64 <sup>37</sup> °C
teta 2	50 <sup>37</sup> °C	teta 2	260 <sup>37</sup> °C
delta h s	520 <sup>37</sup> kJ/kg	delta h s	-520 kJ/kg
Q Wärme	0,486109 kW	Q Wärme	-0,4921 kW

Tabelle 29: Analyse Berechnung der Aufschmelzenthalpie<sup>36</sup>

Wird angenommen, dass bei einem Produkt von 19,4g Schussgewicht und einer Zykluszeit von 35s wie im betrachteten Prozess das Material von 50°C vom Eintritt in die Plastifizierungszone mit 215°C ins Werkzeug eingespritzt wird, ergibt dieses eine aufgewendete Wärmeleistung von 0,49kW. Die Produkte verlassen das Werkzeug mit 43,64°C Temperatur<sup>37</sup> und werden somit mit einer Leistung von ca. 0,58kW durch die Formkühlung heruntergekühlt. Dieses entspricht auch den Ergebnissen der Formkühlung in der Raumbilanz von 0,49kW. Die Abweichung wird in der später folgenden Abweichungsanalyse besprochen.<sup>38</sup>

### 10.1.2 Auswirkungen von Öltemperaturänderung

Wird die Öltemperatur erhöht, sinkt die Ölkühlung ausgehend von einem Wert von 2,94kW über 2,89kW (bei 50°C Öltemperatur) auf 2,80kW (bei 55°C Öltemperatur). Die Flanschkühlung ändert ihren Wert von 0,57kW auf 0,54kW. Die elektrische Leistung steigt von 5,55kW um ca. 0,5% auf zuerst 5,58kW bei 50°C Öltemperatur. Sie steigt dann weiter auf 5,60kW bei 55°C. Insgesamt eine Leistungszunahme um 1% von 45°C auf 55°C. Wegen der verminderten Ölkühlung sinkt die Output-Summe der Leistungsbilanz von 6,69kW auf schließlich 6,55kW. Grund dafür ist die verminderte Wärmeabfuhr für die Öltemperaturerhöhung. Denn das Öl „soll“ eine höhere Temperatur erreichen durch verminderte Kühlung. Demzufolge wird der Durchfluss bei der Ölkühlung reduziert um die Kühlleistung durch weniger Wasserdurchfluss zu reduzieren.

<sup>36</sup> Messung der Temperaturen mittels Messsystem, Globale Variablen: 1. Schmelztemperatur (Düse), 2. Teiletemperatur

<sup>37</sup> Information zur maximalen Teiletemperatur in Exeldateien/Versuch13\_PE\_Temperaturänderung\_Flansch\_13\_Versuch\_Temperaturänderung\_Flansch

<sup>38</sup> Info zu cp-Werten aus N.N. Werkstoffdatenblatt PP, KHP Kunststofftechnik e.K., Aurachtal, Datenblätter über die Kunststoffe „PPH9020“ und „PE1800H“ sind dem Anhang zu entnehmen

Bilanz Raummessung	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- und Formkühlung in kW	Lüftung in kW	Raumsolierung in kW	Heizung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,89	0,61	0,54	1,85	1,30	1,00	5,58	0,48	7,06	6,65	94%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,80	0,60	0,54	1,85	1,30	1,00	5,60	0,48	7,08	6,55	93%

Tabelle 30: Analyse Raumleistung Grundzustand und Öltemperaturerhöhungen

Wird die Einspritzarbeit betrachtet, verändert sich bei der Erhöhung der Öltemperatur die Förderarbeit der Haltepumpe ein wenig um 0,1kW. Die Wärmearbeit der Regelpumpe erhöht sich ebenso (Öltanktemperatur nun 55°C) von 0,69kW auf 0,73kW. Die Lecköl-Wärmearbeit der Regelpumpe nimmt zu um 0,28kW. Bei dem Bilanz-Output auf der hydraulischen steigt die Einspritzarbeit bei 50°C ein wenig von 0,78kW auf 0,79kW. Nach der zweiten Erhöhung der Öltemperatur auf 55°C steigt die Einspritzarbeit stärker von 0,79kW bei 50°C auf einen höheren Wert als der Ausgangswert von 0,82kW. Genauso verhält sich der spezifische Teil der Einspritzarbeit.

Bilanz Einspritzen	Arbeit										Einspritzarbeit		
	Förd. Regelp. in kW	Förd. Haltep. in kW	Wärme Regelp. in kW	Wärme Haltep. in kW	Lecköl Wärme Regelp. in kW	Lecköl Wärme Haltep. in kW	Konvektion Pumpe in kW	Elektrische Leistung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil	Hydraulisch in kW	Spezifisch in kW
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,07	0,43	0,71	0,04	1,61	2,03	0,23	7,21	7,21	6,12	85%	0,79	0,73
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,12	0,43	0,73	0,04	1,83	2,03	0,21	7,41	7,41	6,38	86%	0,82	0,75

Tabelle 31: Analyse Einspritzen Grundzustand und Öltemperaturerhöhungen

Die Förderarbeit der Regelpumpe erhöht sich hier allerdings von 1,06kW auf 1,12kW um ca. 5%. Auf der elektrischen Seite ist eine mit der steigenden Öltemperatur kontinuierliche Vergrößerung der elektrischen Einspritzarbeit um 3% (bei 55°C) zu beobachten. Das Öl läuft demnach mit der 45°C Vorgabetemperatur am besten und liefert so zur Schmierung die besten Ergebnisse.

Beim Plastifizieren sind ebenso einige Veränderungen der einzelnen Komponente zu erfassen. Die Förderarbeit der Regelpumpe steigt kontinuierlich von 4,86kW auf 5,11kW. Die Förderarbeit der Haltepumpe bleibt konstant bei von 0,57kW. Der Wärmestrom der Regelpumpe nimmt bei 50°C Öltemperatur etwas zu und steigt dann weiter bis zu 55°C. Die Leckölströme steigen mit der

Öltemperaturerhöhung ebenfalls an. Die Lecköltemperatur ist aber um 1 bis 2°C kleiner als beim Einspritzen. Dort liefert die Leckölleitung einen schnellen Ölschuss und die Temperatur ist dort kurzzeitig höher (wie mit dem Testo Handgerät gemessen). Beim Plastifizieren dauert wegen der längeren Plastifizierzeit die Messung doppelt so lange und die Temperatur sinkt während der Messung etwas. Sie erreicht nicht den hohen Spitzenwert von beispielsweise 82°C wie beim Einspritzen.<sup>39</sup> Mit einer Erhöhung der Öltemperatur steigt auch die Oberflächentemperatur der Pumpe, aber langsamer als die Temperaturerhöhung des verwendeten Öles im Tank. Wegen der höheren Öltemperatur verschlechtert sich der Schmierfilm. Es verkleinert sich durch eine kleinere Temperaturdifferenz von der Öltemperatur des Tanks zur Pumpenoberfläche die Konvektionsarbeit der Pumpe in den Öltank von 0,53kW/s auf 0,41kW/s.

Bilanz Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Förd. Regelp. in kW/s	Förd. Haltep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Haltep. in kW/s	Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	Konvektion Pumpe in kW/s	Elektrische Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s	Deckungsanteil %
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06	84%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	5,02	0,57	4,21	0,14	2,44	1,75	0,45	16,73	16,73	14,58	87%	4,14	83%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	5,11	0,57	4,44	0,14	2,53	1,59	0,41	17,21	17,21	14,81	86%	4,26	83%

Tabelle 32: Analyse Plastifizieren Grundzustand und Öltemperaturerhöhungen

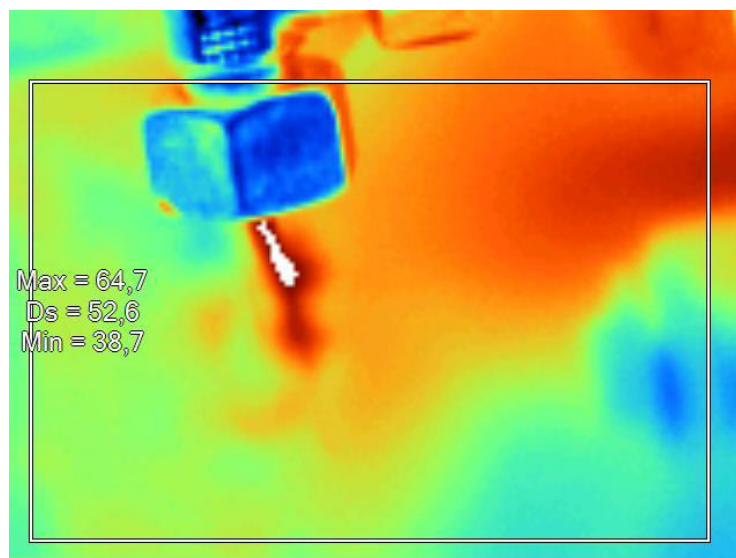


Abbildung 111: Infrarotbild Leckölstrom Regelpumpe beim Einlaufen der Maschine

<sup>39</sup> Wird in der Messreihe mit den neuen Shell Tellus S4 Öl gemessen



Die obere Abbildung zeigt den Leckölstrom der Regelpumpe bei einer Öltemperatur von 38°C. Die Maschine befindet sich im Aufheizmodus und wird auf 45°C Solltemperatur eingefahren. Schon bei diesem Zustand ist eine Temperaturdifferenz von mehr als 25°C zu messen. Die in der Abbildung maximal ermittelte Temperatur ist in weißer Farbe dargestellt. Sie entspricht der an der Austrittsöffnung vorkommenden Lecköltemperatur von 64,7°C und das Lecköl wird aus der Leckölleitung wieder in den Öltank abgelassen.

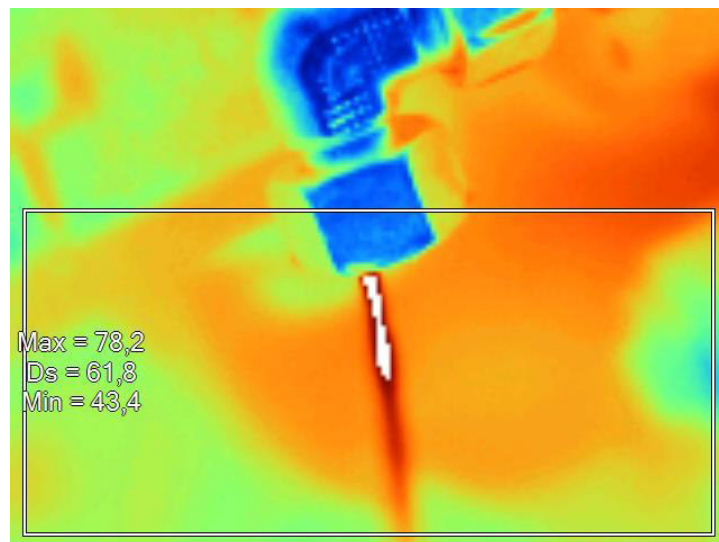


Abbildung 112: Infrarotbild Leckölstrom der Regelpumpe bei Öltemperaturerhöhung

Die Auswirkung einer Öltemperatur im Tank von 45°C wird in der Abbildung 112 dargestellt. Die Öltemperatur des Leckölstroms weist auf der Infrarotkamera einen Spitzenwert von 78,2°C auf. Das entspricht somit einer Temperaturdifferenz von 28,2°C.<sup>40</sup> Weitere Messungen mit dem Testo-Handgerät ergeben, dass die Lecköltemperatur bei einer Tanktemperatur von 45°C im Einspritzvorgang auf einen Spitzenwert von über 82°C an der Leckölöffnung kommt (beim Shell Tellus S4). Dieses ist nicht so schnell zu fotografieren, jedoch mit dem Testo Handgerät zu messen. Verwendet werden für die Leckölmessungen ausschließlich Durchschnittstemperaturen nach 1 oder 2 Sekunden. Gemessen alle 100ms, d.h. für eine Sekunde Messung werden 10 Temperaturen aufgenommen und in der SPS gemittelt.

Das Verhalten der steigenden Temperaturdifferenz ist bei der Haltepumpe ebenso zu beobachten. Jedoch sind die Temperaturdifferenzen im Bereich von 10°C. Die Volumenströme sind bei der Haltepumpe jedoch größer als bei der Regelpumpe. Der Grund für die höheren Arbeitswerte wird in

<sup>40</sup> Die Messung (Fotografie) dient dazu die Temperaturdifferenz an der Leckölleitung zum Öltank prinzipiell darzustellen. Die genauen Werte werden mit Testo Handgerät ermittelt.

dem Verhalten der unterschiedlichen Viskositätsindices bei unterschiedlicher Betriebstemperatur zu suchen sein.<sup>41</sup>

### 10.1.3 Auswirkungen von Materialtausch

Bilanz Raummessung	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- und Formkühlung in kW	Lüftung in kW	Raumisolierung in kW	Heizung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
Materialtausch PE1800H	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,06	5,60	0,48	7,14	6,76	95%

Tabelle 33: Analyse Auswirkungen Raumleistungen bei Materialtausch

Die Auswirkungen des Materialtausches werden in der Vergleichstabelle deutlich. Die Antriebsleistung steigt um einen kleinen Anteil von 5,55kW auf 5,60kW. Die anderen Bilanzgrößen verändern sich ebenfalls minimal. Insgesamt verändern sich der Input von 7,03kW auf 7,14kW und der Output von 6,69kW auf 6,76kW. Der ausschlaggebendste Grund wird die Veränderung der Lüftungsleistung von 1,85kW auf 1,91kW sein. Durch ein Anteigen der Heizleistung wird mehr Wärme in den Raum abgeführt.<sup>42</sup> Die Summe am Bilanzausgang müsste demnach bei PE auf 225°C gefahrener Heiztemperatur höher sein. Es wäre demnach mit einer Energiezunahme von 0,07kW zu rechnen.<sup>43</sup>

Bilanz Einspritzen	Arbeit										Einsprizarbeit		
	Förd. Regelg. in kWs	Förd. Haltep. in kWs	Wärme Regelg. in kWs	Wärme Haltep. in kWs	Lecköl Wärme Regelg. in kWs	Lecköl Wärme Haltep. in kWs	Konvektion Pumpe in kWs	Elektrische Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Spezifisch in kWs	Hydraulisch in kWs
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73
Materialtausch PE1800H	1,71	0,54	1,33	0,04	2,48	2,57	0,29	10,74	10,74	8,95	83%	1,38	1,18

Tabelle 34: Analyse Einspritzen Auswirkungen bei Materialtausch

<sup>41</sup> Dazu bitte die Datenblätter von den Ölen „Tellus S2“, „Tellus S4“ und „DTE10 EXCEL“ im Internet zu entnehmen!

<sup>42</sup> Die Laborbedingungen liefern sehr oft nur Messungen mit einer Genauigkeit von 0,2 bis 0,3kW gegenüber Heizungs- und der resultierenden Raumluftänderung. Dass die Differenz in dieser Messung dem gleichen Wert 0,6kW entspricht, war zufällig durch günstige Umweltbedingungen der Fall.

<sup>43</sup> In den laufenden Messungen schwankt die Outputgröße und steht bei einer Erhöhung der Inputgröße nicht immer prozentual gesehen im richtigen Verhältnis. Es sind Abweichungen von ca. 4% vorhanden. Grund dafür ist die träge Ölkühlung. Die Regelung wird im Kapitel 10.4, Seite 175 erläutert.

Werden die Parameter für das Einspritzen betrachtet, können zwischen der Verwendung von PP und PE folgende Unterschiede festgestellt werden: Die Förderarbeit der Regelpumpe steigt erheblich von 1,06kWs auf 1,71kWs, ebenso die Förderarbeit der Haltepumpe von 0,39kWs auf 0,54kWs. Die beiden Wärmeströme in den Druckleitungen vergrößern sich auch um 0,64kWs für die Regel- und 0,01kWs für die Haltepumpe und die Leckölströme von 1,55kWs auf 2,48kWs für die Regelpumpe und von 2,03 auf 2,57kWs für die Haltepumpe. Es folgt die Veränderung der elektrischen Einspritzarbeit von 7,19kWs auf 10,74kWs. Somit steigt der Output des Systems von 6,02kWs auf 8,95kWs. Die Outputgrößen der Prozessbilanz steigen fast auf das Zweifache, von 0,73kWs werden nun 1,18kWs in spezifische Einspritzarbeit umgesetzt. Im Input dagegen werden nur 30% Zunahmen gemessen.

Bilanz Plastifizieren	Arbeit												Dosiermotor	
	Förd. Regelp. in kWs	Förd. Haltep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Haltep. in kWs	Lecköl Wärme Regelp. in kWs	Lecköl Wärme Haltep. in kWs	Pumpe in kWs	Korrektion Leistung in kWs	Elektrische Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kWs	Deckungsanteil %
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06	84%	
Materialtausch PE1800H	6,75	0,65	4,78	0,17	2,77	1,85	0,61	20,13	20,13	17,58	87%	5,55	82%	

Tabelle 35: Analyse Plastifizieren Auswirkungen bei Materialtausch

Die Daten beim Plastifizieren weisen ähnliche Unterschiede wie beim Einspritzen auf. Die Förderarbeit der Regelpumpe steigt von 4,86kWs auf 6,75kWs, ebenso die Förderarbeit der Haltepumpe von 0,57kWs auf 0,65kWs. Beide Wärmeströme in den Förderleitungen steigen von 3,93kWs auf 4,78kWs für die Regel- und von 0,15kWs auf 0,17kWs für die Haltepumpe. Die Leckölströme für die Regelpumpe steigen von 2,31kWs auf 2,77kWs und von 1,71kWs auf 1,85kWs für die Haltepumpe. Dieses ruft eine Veränderung von 16,25kWs elektrischer Plastifizierarbeit auf 20,13kWs hervor. Der Output verändert sich von 14,06kWs auf 17,58kWs. Die angestrebte hydraulische Arbeit, welche der Dosiermotor im Formgebungsprozess abgibt, ändert sich von 4,06kWs auf 5,55kWs. Das sind ca. 35% mehr abgegebene Arbeit.

Nachfolgende Abbildung 113 zeigt die gemessene Leckölmenge der Regelpumpe. Diese steigt mit dem Tausch des Materials von PPH auf PE um ca. 10 bis 15ml. Die unterschiedlichen Leckölströme werden auch in den Parametertabellen der Analyse im Anhang unter 13.9, S.214ff. in den Rechnungen dargestellt.

Grund für die Veränderung der Leistungsgrößen in der Raumbilanz und der Arbeitsgrößen in der Prozessbilanz sind zum einen die unterschiedlichen Wegwerte, die bei unterschiedlichen Materialien

gefahren werden und zum anderen die Veränderten Druckwerte vom Systemdruck Hydraulik. Die Wegwerte erfordern bei der Verwendung von PP eine andere Einstellung als bei PE. Der Startzeitpunkt, als Wegwert abgebildet (wegen der Integrationsformel über dem Weg), für die PP Variante wird für die Integration ein anderer Startpunkt gewählt als für die PE-Variante. Grund sind andere Einstellungen für das sog. Massepolster. Der Druck steigt bei PP erst ab einem Wegwert von 3,8mm an. Ab diesem Zeitpunkt beginnt die Integration der Einspritzgröße. Bei PE beginnt die Integration schon ab einem Wegwert von 2,1mm. Warum musste diese Änderung (welche einen unerlaubten Parametereingriff in die Versuche darstellt) vorgenommen werden? Diese Frage muss an dieser Stelle der Dissertation gestellt werden.

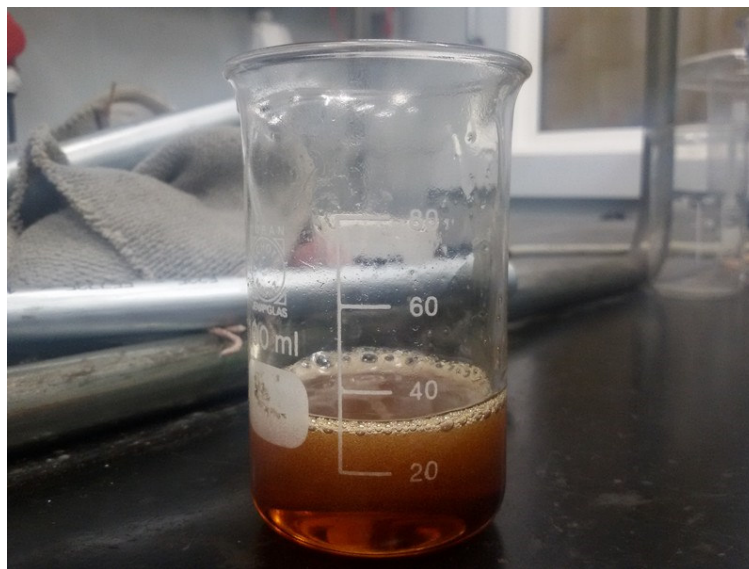


Abbildung 113: Leckölmenge Einspritzen PPH9020, mit Tellus S2 Grundzustand vor Ölspülung

Die Ursache liegt an der Erstellung des Bausteins „Sensoren Einlesen“. Für den Start der Kumulation wird im Versuchsaufbau ein Baustein erstellt, welcher den „Start- und den Stop-Befehl“ des Integrierens an der Schneckenposition ableitet. Die Integration erfolgt bei der PE Variante um einen kleinen Teil früher als bei der PP Variante. Somit werden für die Prozessbilanz andere Voraussetzungen geschaffen, die zu anderen Integrationsgrößen und einem anderen Einspritzweg führen. Diese Parameteränderung ist erforderlich um weiterhin die gesamte Einspritzkurve integrieren zu können. Die Veränderung des Verlaufes nimmt die Maschine selbst vor. Demnach kann diese Veränderung nicht selbst ausgeschaltet werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Anfangs- und Endpunkte der Integrationskurve und den zeitlichen Verlauf auf der x-Achse. Die rote Kurve ist der „umgerechnete Einspritzweg“ (umgerechnet, d.h. invertiert von 0 bis max. Wert, während die Maschine über Weggeber max. bis 0 Werte ausgibt).

Die obere rote Kurve zeigt einen Vorgang zur Analyse, welcher mit verminderter Geschwindigkeit gefahren wird. Die obere Wegänderung findet bei PP statt. Die Wegänderung verläuft durch das andere Dosiervolumen schneller als bei PE, wenn die Parameter an der Maschine verändert werden. Der Integrationsstartpunkt wird später erreicht. Es muss ein Wegwert von 3,8 eingestellt werden um die Integration zu starten. Insgesamt wird aber bei der Einspritzarbeit für PE etwas mehr Material gegeben. Die Einspritzarbeit wird demnach für die endgültigen Ergebnisse um 1s in der SPS Messung für PP und bei PE bei ca. 1,1s liegen. Dieses kann den Primärdaten in den Maschinendaten File entnommen werden (siehe Anhang der Arbeit unter dem Ordner „Zykluszeiten“).

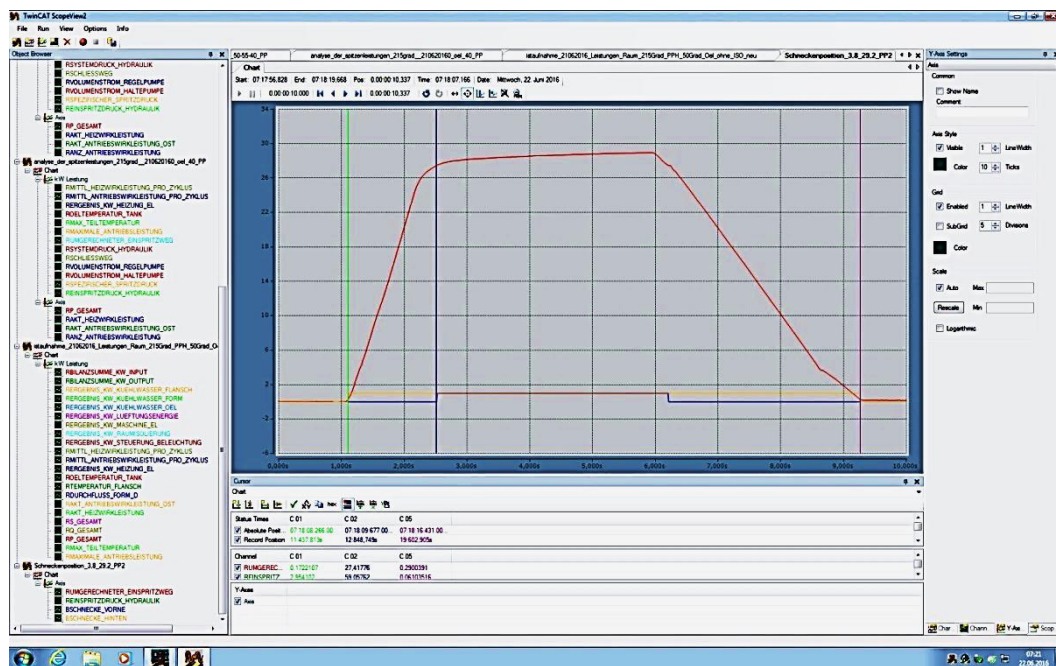


Abbildung 114: Einstellpunkte für Kumulationsvorgang

Aus physikalischer Sicht kann für das unterschiedliche Verhalten die Fließrate von PP und PE herangezogen werden.

Die Datenblätter im Anhang zeigen für PPH9020 eine größere „Melt Flow Rate“<sup>44</sup> als für PE1800H. Der Wert 25g/10 min für Polypropylen wird laut Datenblatt<sup>45</sup> bei einer Verarbeitungstemperatur von 230°C gemessen. PE1800H dagegen besitzt bei 190°C eine Melt Flow Rate von 1,6g/10min. Diese Zahlen lassen sich wegen der unterschiedlichen Ausgangstemperatur in den Datenblättern nur indirekt miteinander vergleichen. Es sind aber Tendenzen, die dieses unterschiedliche Verhalten in den Energiewerten begründen. Demnach steigt auch der Druck im Spritzgießvorgang leicht und führt somit zu diesem Ansteigen der Förderarbeiten der Regelpumpe.

<sup>44</sup> „Meld Flow Rate“ gibt Aussagen über das Fließverhalten eines Kunststoffes bei bestimmter Temperatur an

<sup>45</sup> Datenblätter über die Kunststoffe „PPH9020“ und „PE1800H“ sind dem Internet zu entnehmen.

## 10.2 Abweichungen, Maßnahmen zur Energieeinsparung

### 10.2.1 Auswirkungen der Heizungsisolierung

Bilanz Raummessung	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Lüftung in kW	Raumis- isolierung in kW	Heizung in kW	Antriebs- leistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
Isolierung, 215°C Heizung	2,90	0,61	0,57	1,76	1,30	0,90	5,55	0,48	6,93	6,57	95%

Tabelle 36: Analyse Raumbilanz, Auswirkungen der Heizungsisolierung

Die Auswirkungen der Heizungsisolierung zeigen in der Raumbilanz nur minimale Veränderungen. Die Leistung der Ölkühlung soll in dieser Untersuchung unberücksichtigt bleiben. Die mittlere Antriebsleistung und die Formkühlung bleiben unverändert. Es sinken die Werte für die Raumlüftungsleistung und die mittlere Heizleistung pro Zyklus. Dieses führt zu einer Senkung beider Leistungsgrößen, dem Leistungsinput und dem Leistungsoutput, um ca. 100Watt.

Bilanz Einspritzen	Arbeit										Einspritzarbeit		
	Förd. Regelp. in kW	Förd. Haltep. in kW	Wärme Regelp. in kW	Wärme Haltep. in kW	Lecköl Wärme Regelp. in kW	Lecköl Wärme Haltep. in kW	Pumpe in kW	Konvektion Leistung in kW	Elektrische Leistung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil	Spezifisch in kW
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73
Isolierung, 215°C Heizung	1,05	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,21	7,19	7,19	5,95	83%	0,78	0,73

Tabelle 37: Analyse Einspritzen, Auswirkungen der Heizungsisolierung

Wird die Einspritzarbeit der Regelpumpe näher betrachtet, verringert sich diese dort um 0,01kW. hydraulisch und spezifisch sind keine Auswirkungen erkennbar. Diese Isolierung macht sich auf die Antriebsleistung in der Raumbilanz mit 5,55kW nicht bemerkbar, auch bei der elektrischen Einspritzarbeit nicht. Dieses hätte auch auf konstante Größen im Einspritzvorgang schließen können. Ähnlich sieht es bei der Plastifizierarbeit aus. Die Veränderung macht an der Bilanzierungsseite nur 0,1kW aus, am Output nur 0,03kW Differenz. Die Differenz der Förderarbeit der Regelpumpe beträgt ebenso 0,1kW. Weitere Unterschiede sind in Tabelle 38 nicht erkennbar.

Bilanz Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Förd. Regelp. in kW/s	Förd. Haltep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Haltep. in kW/s	Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	Konvektion Pumpe in kW/s	Elektrische Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s	Deckungsanteil %
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06	84%
Isolierung, 215°C Heizung	4,76	0,57	3,91	0,15	2,22	1,71	0,38	16,05	16,00	13,70	86%	4,03	85%

Tabelle 38: Analyse Plastifizieren Auswirkungen der Heizungsisolierung

Die folgende Abbildung zeigt die Heizung mit Isolierung. Als höchsten Wert wird eine Temperatur von 59,5°C gemessen. Im Mittelwert liegt die Temperatur bei 53,1°C. Die Isolierung führt zu einer geringeren Abstrahlung der Wärme an die Umgebung und somit zu einer niedrigeren Raumtemperatur. Somit gleichen sich beide Bilanzseiten (der elektrische Input und die Raumwärmeleistung als Output) wieder aus.

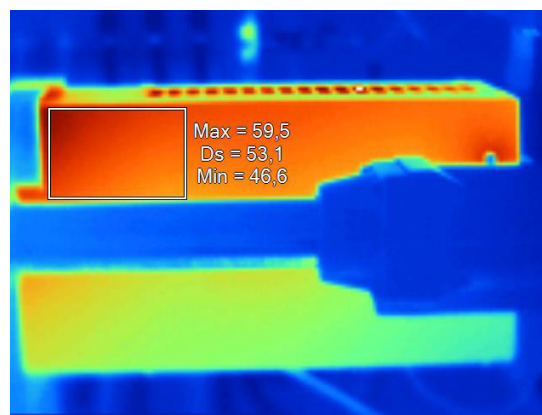


Abbildung 115: Infrarotbild mit Heizungsisolierung

### 10.2.2 Auswirkungen von Öltausch mit Shell S4

Wird ein Ölwechsel durchgeführt, kommen für die Raumbilanz die folgenden Leistungen zustande: In der Raumbilanz sinken die Antriebsleistungen von 5,55kW auf 5,38kW. Dadurch sinkt die Summe an Leistungsinput um diesen Betrag. Es kann somit Energie von ca. 3,5% durch die Verwendung des Shell Tellus S4 eingespart werden. Der Deckungsanteil der Raumbilanz verbessert sich ein wenig. Die o.g. Energieeinsparung richtet sich auf die mittlere Antriebsleistung pro Zyklus. Die Antriebsleistung wird aber in den Vordergrund gestellt. Die Veränderung wird auch bei der Temperaturänderung auf 55°C mit 5,40kW erreicht. Auch hier ist die mittlere Antriebsleistung niedriger und ggü. dem Grundzustand 2,3% effizienter. Gegenüber dem Tellus S2 bleibt das Tellus S4 in der Leistung verglichen mit vorheriger Öltemperaturniveau von 50°C konstant. Nur 0,02kW Leistungsanstieg ist zwischen 45°C und 55°C Temperaturdifferenz zu messen. Beim Tellus S2 steigt die Leistung um 0,05kW.

Bilanz Raummessung	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Fornkühlung in kW	Flansch- und Flansch- in kW	Lüftung in kW	Raumisolierung in kW	Heizung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,89	0,61	0,54	1,85	1,30	1,00	5,58	0,48	7,06	6,65	94%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,80	0,60	0,54	1,85	1,30	1,00	5,60	0,48	7,08	6,55	93%
Änderung Öl, Shell Tellus S4, PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,00	5,38	0,48	6,86	6,76	98%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,85	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,39	0,48	6,87	6,61	96%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,81	0,46	0,57	1,88	1,30	1,00	5,40	0,48	6,88	6,44	94%

Tabelle 39: Analyse Raumbilanz Auswirkungen Öltausch zu Shell Tellus S4

Die Erkenntnisse (in Abbildung 98, S.142) der ersten Ansicht des Antriebsverhaltens beim Dosieren zeigen, dass das Tellus S4 ein stabileres Verhalten bei höheren Temperaturen in einem gleichmäßigen Abruf der Leistung in diesem Vorgang aufweist. Bei dem Tellus S2 hat eine Temperaturveränderung um 10°C von 45°C auf 55°C stärkere Auswirkungen (Abbildung 95, S.140). Das Verhalten ist nun bei dem Einspritz- und Plastifiziervorgang an den Arbeitsdaten zu untersuchen.

Wird die Einspritzarbeit betrachtet, sinkt die Förderarbeit der Regelpumpe bei der Verwendung des neuen S4 Öles von 1,06kW (Tellus S2) auf 1,00kW (Tellus S4). Die Förderarbeit nimmt wieder mit höherer Öltemperatur (55°C) nur wenig zu. Dieses spricht auch hier für eine nur minimale Abnahme der Schmiereigenschaft des Öles bei zu hoher Öltemperatur. Der Wärmestrom der Regelpumpe bleibt mit dem neuen S4 Öl in etwa gleich. Die Durchflüsse werden ein wenig größer. Diese und die Temperaturen sind in der Parametertabelle (Tabelle 63, S.215) zu entnehmen. Es verkürzen sich die Zykluszeiten ein wenig, d.h. um 0,2s. Die Messzeiten sind in Tabelle 88 auf Seite 238 dargestellt. Die Leckölströme der Regelpumpe werden deutlich reduziert. Bei dem Tellus S2 sind 1,55kW Wärmearbeit des Lecköls vorhanden und beim Tellus S4 nur 0,95kW. Diese Arbeitsdifferenz zwischen 45° und 55°C ist beim Tellus S2 deutlich größer. Sie erreicht dort einen Wert von 0,2kW. Ebenso wie zu der Energieeinsparung des Antriebs ist mit einem fallenden Wert bei der Einspritzarbeit am Output zum Hydraulikzylinder zu rechnen. Die Werte unterscheiden sich beim Tellus S4 mit der steigenden Öltemperatur nur um ca. 0,2kW statt 0,4kW beim Tellus S2. Mit dem neuen Öl werden nur 0,70kW bei 45°C am Ausgang hydraulisch umgesetzt. Vorher waren es 0,78kW mit dem Tellus S2. Spezifisch werden hier ca. 0,05kW gewonnen. Abbildung 97 auf Seite 142 deutet dieses energieeinsparende Verhalten beim Tellus S4 schon an. Die rote Kurve des Tellus S4 ist deutlich niedriger als die des Tellus S2 Öls (Tellus S2 in Abb.94, S.140).



Bilanz Einspritzen	Arbeit										Einspritzarbeit		
	Förd. Regelp. in kW/s	Förd. Haltep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Haltep. in kW/s	Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	Konvektion Pumpe in kW/s	Elektrische Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Hydraulisch in kW/s	Spezifisch in kW/s
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,07	0,43	0,71	0,04	1,61	2,03	0,23	7,21	7,21	6,12	85%	0,79	0,73
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,12	0,43	0,73	0,04	1,83	2,03	0,21	7,41	7,41	6,38	86%	0,82	0,75
Änderung Öl, Shell Tellus S4, PPH9020	1,00	0,39	0,68	0,03	0,95	1,95	0,26	6,6	6,6	5,28	81%	0,70	0,68
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,01	0,39	0,71	0,03	0,99	1,95	0,23	6,6	6,6	5,31	81%	0,72	0,68
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,02	0,39	0,72	0,06	0,99	1,95	0,21	6,7	6,7	5,35	81%	0,72	0,70

Tabelle 40: Analyse Einspritzen Auswirkungen Öltausch zu Tellus S4

Wird die Plastifizierkurve analysiert, kann auch hier mit Abnahme der Förderarbeit der Regelpumpe gerechnet werden. Von 4,86Ws fällt die Arbeit auf 4,71kWs. Die Förderarbeit der Haltepumpe steigt leicht an und weist bei 45°C Öltemperatur einen Wert von 0,65kWs beim Tellus S4 gegenüber dem Wert 0,57kWs beim Tellus S2 auf. Aber die Wärmearbeit der Regel-und Haltepumpe nehmen mit dem neuen Tellus S4 Öl ab, genauso wie die Leckölwärmearbeiten. Am Ende liefert die Bilanz einen am Dosiermotor niedrigeren Output von 4,06kWs auf ca. 3,94kWs. Die Abnahme der Leistungen beim Öltausch lässt auch hier auf eine bessere Schmiereigenschaft des Öles schließen.

Bilanz Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor	
	Förd. Regelp. in kW/s	Förd. Haltep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Haltep. in kW/s	Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	Konvektion Pumpe in kW/s	Elektrische Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	5,02	0,57	4,21	0,14	2,44	1,75	0,45	16,73	16,73	14,58	87%	4,14
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	5,11	0,57	4,44	0,14	2,41	1,59	0,41	17,21	17,21	14,69	85%	4,26
Änderung Öl, Shell Tellus S4, PPH9020	4,71	0,65	3,68	0,19	1,67	1,43	0,53	15,70	15,70	12,85	82%	3,94
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	4,78	0,68	3,77	0,22	1,61	1,49	0,45	15,75	15,75	13,00	83%	3,94
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	4,85	0,70	3,98	0,19	1,61	1,49	0,41	15,77	15,77	13,24	84%	3,98

Tabelle 41: Analyse Plastifizieren Auswirkungen Öltausch zu Tellus S4

Die Erhöhung der Öltemperatur führt z.B. beim Plastifizieren bei dem Tellus S2 zu einem Anstieg von ca. 5% in der Förderleistung und um ca. 5% Antriebsarbeit elektrisch. Bei dem Tellus S4 sind es nur ca. 2,8% Zunahme in der Förderarbeit bei Öltemperaturerhöhung. Bei der elektrischen Arbeit ist beim Tellus S2 eine größere Zunahme dagegen beim Tellus S4 fast keine Zunahme zu beobachten.

Dieses lässt auf ein betriebssicheres Verhalten des Öles bei höheren Temperaturen im Plastifizierungsvorgang schließen als bei dem Tellus S2. Abbildung 98 und Abbildung 95 nehmen diese Aussage schon vorweg.

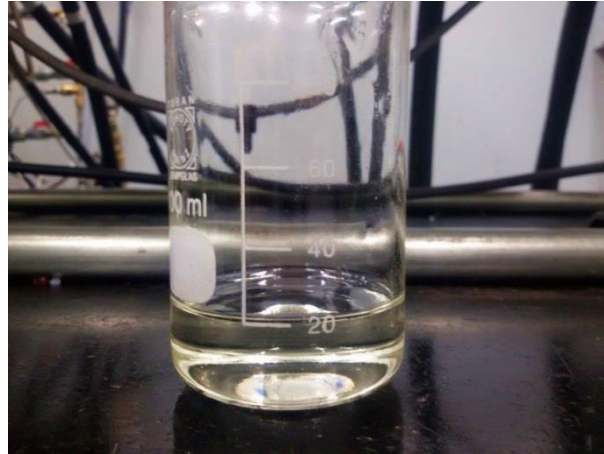


Abbildung 116: Leckölmenge Regelpumpe Shell Tellus S4

Abbildung 116 zeigt, dass die Leckölmenge bei dem Tellus S4 Öl schon beim Einspritzvorgang deutlich reduziert wird. Von vorher ca. 30ml (Abbildung 113) sind nun nur noch ca. 20ml nachweislich messbar. Dieses reduziert die Leckölmearbeit in beiden Vorgängen (Einspritzen und Plastifizieren) erheblich und führt (wenn auf dieses Verhalten in anderen Vorgängen ebenso geschlossen werden kann) zu einer deutlichen Energieeinsparung der mittleren Antriebsleistung pro Zyklus. Die synthetische Eigenschaft des Öls führt zu dieser in der oberen Abbildung gezeigten klaren Flüssigkeit im Vergleich zum Tellus S2.

Ursache für die Energieeinsparung und die dadurch bessere Energiebilanz wird in dem besseren Viskositätsverhalten des synthetischen Öles liegen. Die Förderarbeit der Regelpumpe ist bei den Einspritz- und Plastifizierungsvorgängen leicht gefallen, unabhängig von der Öltemperatur ist immer eine Differenz zwischen Tellus S2 und Tellus S4 vorhanden. **Dieses würde bedeuten, dass weniger Arbeit ins System eingebracht wird aufgrund niedrigerer Drücke bei leicht ansteigendem Durchfluss, hervorgerufen durch leichtere Bewegungsvorgänge, deshalb auch ein leichtes Sinken der Outputgrößen „Einspritzarbeit hydraulisch“ und „Plastifizierarbeit hydraulisch“.** *Das widerspricht keineswegs dem Versprechen des Herstellers eine Effizienzverbesserung durch eine Verwendung dieses synthetischen Öles zu erhalten.* Wird auch die Leckölmenge in diese Aussage miteinbezogen, ist ein Sinken dieser Menge (Beweis die Messung mit Messzylinder) und eine Abnahme des Leckölmestromes, hervorgerufen durch diese geringere Leckölmenge, ersichtlich. Demzufolge fließt weniger Öl an den Hydraulikkolben in der Pumpe selbst vorbei (anschließend Leckölleitung) und steht nun stattdessen für die Förderleistung zur Verfügung, welche aber durch bessere

Schmiereigenschaften nicht benötigt wird.<sup>46</sup> Der positivere Kennwert des Luftabscheidevermögens weist ebenso auf eine Temperaturstabilität des S4 Öles hin.<sup>47</sup> Der Schmierfilm bleibt bei längeren Betriebsdauern und höheren Betriebstemperaturen durch vermindernde Dieseleffekte beibehalten.

### 10.2.3 Auswirkungen von Öltausch zu Mobil DTE10 EXCEL

Bilanz Raummessung	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- und Formkühlung in kW	Lüftung in kW	Raumsolierung in kW	Heizung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,89	0,61	0,54	1,85	1,30	1,00	5,58	0,48	7,06	6,65	94%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,80	0,60	0,54	1,85	1,30	1,00	5,60	0,48	7,08	6,55	93%
Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,00	5,40	0,48	6,88	6,76	98%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,81	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,41	0,48	6,89	6,57	95%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,77	0,46	0,57	1,85	1,30	1,00	5,42	0,48	6,90	6,37	92%

Tabelle 42: Analyse Raumbilanz Auswirkungen Öltausch zu Mobil DTE10

Bei dem Ölwechsel auf Mobil DTE10 Excel lassen sich Parallelen zu dem vorangegangenen Ölwechsel auf Shell Tellus S4 ziehen. Wird die elektrische Leistung des Antriebs betrachtet, kann hier von einer Energieeinsparung von 2,8 % gesprochen werden. Die Leistung der Lüftung und der Ölkühlung werden auch hier in ihrer Wertveränderung nicht schwerpunktmäßig betrachtet.<sup>48</sup> Mit steigender Öltemperatur steigt die mittlere Antriebsleistung pro Zyklus von 5,40kW auf 5,42kW. Das hat zur Folge, dass die Inputleistung bei der Verwendung des Mobil Öles kleiner ist als bei dem Tellus S2. Wird die Öltemperatur größer, fällt auch die gesamte Inputleistung des Raumsystems von 7,08kW (Grundzustand 55°C) auf 6,90kW (Mobil 55°C) ab. Den Einfluss darauf hat die gewollte Verminderung der Leistung der Ölkühlung für eine Temperaturerhöhung des Öles von 45 auf 55°C.

<sup>46</sup> Das Verhalten unterschiedlicher Öle könnte ein weiteres Thema für eine folgende Arbeit darstellen. Die unterschiedlichen Viskositätsseigenschaften sind in den Datenblättern der Öle im Internet zu finden.

<sup>47</sup> Info über das Luftabscheidevermögen sind den Datenblatt Shell Tellus S4 MA zu entnehmen.

<sup>48</sup> Die Leistung der Formkühlung nimmt mit fallender Ölkühlungsleistung zu. Grund ist hier der verminderte Wasserdurchfluss um die steigende Öltemperatur durch Verminderung der Leistung der Kühlung zu erreichen. Es strömt mehr Wasser durch den Kühlkanal Form und ergibt somit eine größere Leistung. Die Temperaturdifferenz müsste kleiner werden, jedoch bewegt sich diese Differenz unter einem Grad und somit ist ein Messunsicherheitsfaktor vorhanden.

Bilanz Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Förd. Regelp. in kWs	Förd. Haltep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Haltep. in kWs	Lecköl Wärme Regelp. in kWs	Lecköl Wärme Haltep. in kWs	Konvektion Pumpe in kWs	Elektrische Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Hydraulisch in kWs	Spezifisch in kWs	Deckungsanteil
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73	69%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,07	0,43	0,71	0,04	1,61	2,03	0,23	7,21	7,21	6,12	85%	0,79	0,73	68%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,12	0,43	0,73	0,04	1,83	2,03	0,21	7,41	7,41	6,38	86%	0,82	0,75	67%
Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel, PPH9020	1,02	0,39	0,68	0,04	1,19	1,98	0,26	6,8	6,8	5,57	82%	0,73	0,70	69%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,01	0,43	0,74	0,04	1,24	1,98	0,23	6,9	6,9	5,66	82%	0,75	0,69	68%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,04	0,43	0,75	0,03	1,24	1,98	0,19	6,95	6,95	5,66	81%	0,75	0,70	68%

Tabelle 43: Analyse Einspritzen Auswirkungen Öltausch zu Mobil DTE10

Die elektrische Einspritzarbeit nimmt bei der Verwendung des Mobil Öls ebenfalls ab. Von 7,19kWs werden schließlich nur 6,8kWs mit dem neuen Mobil Öl elektrisch eingebracht um einen Einspritzvorgang von 0,73kWs hydraulisch zu betreiben. Spezifisch stehen mit dem Tellus S2 0,73kWs an der Düse zur Verfügung. Mit dem Mobil Öl (aber auch mit dem Shell S4) sind es nun 0,70kWs, d.h. 0,03kWs weniger. Der Leckölmärmestrom der Regelpumpe sinkt auch hier im Vergleich zum Grundzustand um 0,36kWs. Die Förderarbeit der Regelpumpe nimmt ebenfalls ab um 0,04kWs. Es muss auch hier auf die generelle Abnahme des Lecköls (Abbildung 117) von 35ml auf 25ml hingewiesen werden.

Bilanz Plastifizieren	Arbeit											Dosiermotor	
	Förd. Regelp. in kWs	Förd. Haltep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Haltep. in kWs	Lecköl Wärme Regelp. in kWs	Lecköl Wärme Haltep. in kWs	Konvektion Pumpe in kWs	Elektrische Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kWs	Deckungsanteil %
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06	84%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	5,02	0,57	4,21	0,14	2,44	1,75	0,45	16,73	16,73	14,58	87%	4,14	83%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	5,11	0,57	4,44	0,14	2,41	1,59	0,41	17,21	17,21	14,69	85%	4,26	83%
Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel, PPH9020	4,77	0,64	3,85	0,16	1,92	1,37	0,53	15,80	15,80	13,24	84%	3,96	83%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	4,85	0,68	3,91	0,20	1,99	1,36	0,45	15,92	15,92	13,43	84%	4,1	85%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	4,94	0,68	3,98	0,18	1,83	1,41	0,41	15,95	15,95	13,45	84%	4,1	83%

Tabelle 44: Analyse Plastifizieren Auswirkungen Öltausch zu Mobil DTE10

Bei der Plastifizierung kommen wieder ähnliche Energieeinsparergebnisse wie auch beim Vorgang Einspritzen zum Vorschein. Von 16,25kWs elektrischer Plastifizierarbeit mit Shell Tellus S2 werden mit dem Mobil DTE10 EXCEL Öl nur noch 15,80kWs benötigt. Die Förderarbeit der Regelpumpe

nimmt ebenfalls ab und Wärmestrom der Regelpumpe sowie ihr Leckölwärmestrom verringern sich. Der Leckölstrom beispielsweise um ca. 20% von 2,31kW<sub>s</sub> auf 1,92kW<sub>s</sub>.

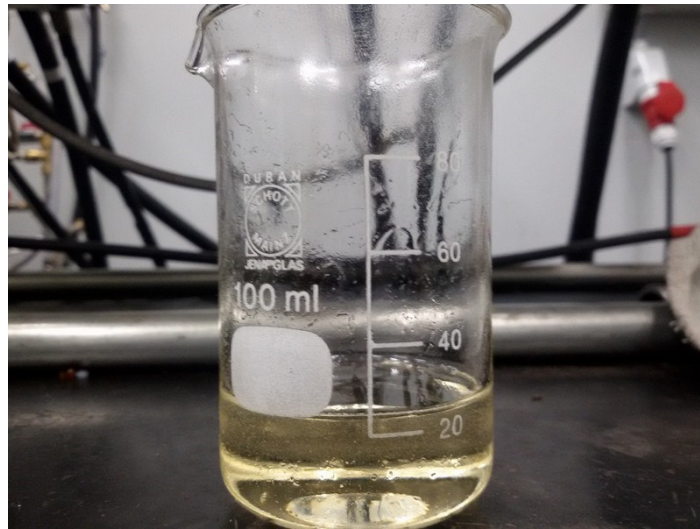


Abbildung 117: Leckölmenge Regelpumpe bei Mobil DTE10 Excel

Die Leckölmengen der beiden Pumpen werden für alle Versuche mit dem Messbecher gemessen und durch mehrere Messreihe ermittelt. Die Menge ist um ein Drittel zum Ursprungszustand gesunken. Während es im Grundzustand ca. 35ml sind (Abbildung 113, S.160), können hier nur 25ml gemessen werden. Die Ursache muss auch bei dem Mobil Öl DTE10 EXCEL in einem leichteren Bewegungsverhalten der Hydrauliksystems liegen, wie auch der Hersteller andeutet.<sup>49</sup> Die Komponenten des Hydrauliksystems lassen sich leichter bewegen, welches zu einer Abnahme der der Regelpumpe Förderarbeit (durch Messungen oben nachgewiesen) und einer Abnahme der einzelnen hydraulischen Vorgänge am Ausgang (ebenfalls nachgewiesen) führt. In der „Bewertung der Ergebnisdarstellung und der Plausibilitätsprüfung“ wird auf diese Veränderung eingegangen.

Das Mobil DTE10 bietet einsparungstechnisch etwas schlechtere Ergebnisse. Die angegebenen Werte des Luftabscheidevermögens liegen beim Mobil DTE10 bei 3min, beim Shell Tellus S4 kleiner 3min. Letztendlich liefert das Shell Tellus S4 etwas bessere Kennwerte, welche sich auch bestätigen.

<sup>49</sup> Siehe Datenblätter zu Tellus S4 und Mobil DTE10 im Anhang

## 10.3 Betrachtung der ergänzenden Versuche

### 10.3.1 Zusammenhang von Schließkraft und Leistungsspitzen

Die folgende Abbildung zeigt einen Spritzgießprozess aus elektrischer Sicht (blaue Kurve) und aus hydraulischer Sicht (rote Kurve). Wird dieser Prozess analysiert, können sofort die Spitzen des Prozesses auf den Prozessteil „Werkzeug Schließen“ zugeordnet werden. Während der Systemdruck gar nicht die höchste Spitze darstellt, ist die Haltepumpe, welche für die Schließkraft und das Zuhalten ebenso verantwortlich ist, ebenso dafür verantwortlich und liefert mit 215bar Zuhaltedruck letztendlich die Leistungsspitzen. Dieses beweisen die Versuchsergebnisse mit der Veränderung der Schließkraft. Die Zuhaltekraft der Maschine ist mit 850kN angegeben. Errechnet werden kann diese Kraft mit der Formel  $P=F/A$  (Druck = Kraft/Fläche) Somit ergibt sich eine Fläche von  $850000\text{N}/215 \cdot 10^5\text{Pa} = 0,0395\text{m}^2$  mit einer Werkzeuggröße im Quadrat von 0,2m.

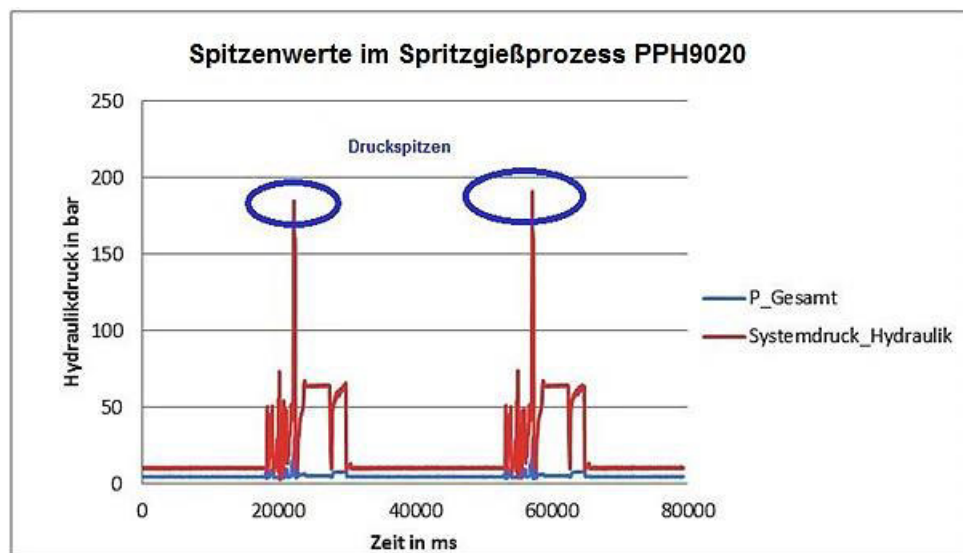


Abbildung 118: Analyse Hydraulikdruck und Gesamtleistung mit Leistungsspitze

Die Veränderung der Schließdrucks auf 50bar kann zu einer Senkung der Spitzenlast von 6kW im Mittelwert führen. Die Excel Tabellen im Anhang führen die Mittelwertberechnung ausführlich durch. Die Senkung der Schließkraft setzt voraus, dass weiterhin Gutteile von der Maschine produziert werden. Die Maschinenfähigkeit und die Maschinensicherheit werden im letzten Teil der Arbeit untersucht. Dabei werden die Materialien einer Qualitätsprüfung unterzogen. Beide Prozesskennzahlen werden mehr als ausreichend erfüllt. Somit ist eine Senkung der Leistungsspitzen um diese 6kW möglich.

Zu Beginn der Arbeit wird auf eine sog. *Spitzenlastermittlung alle 15min* hingewiesen. Als diesem Grund wird in dieser Versuchsreihe die Spitzenlast für jeden eingestellten Schließwert gemittelt.

Würde jeder einzelne Spitzenwert detailliert ausgewiesen, könnte eine viel größere Reduzierung gemessen werden. Nachfolgende Abbildung 119 zeigt als Scope Ausdruck die anfallenden Leistungsspitzen (rot) und das Arbeiten des „Maximum-Bausteins“ (gelb) für eine Auswertung der Leistungsspitzen.

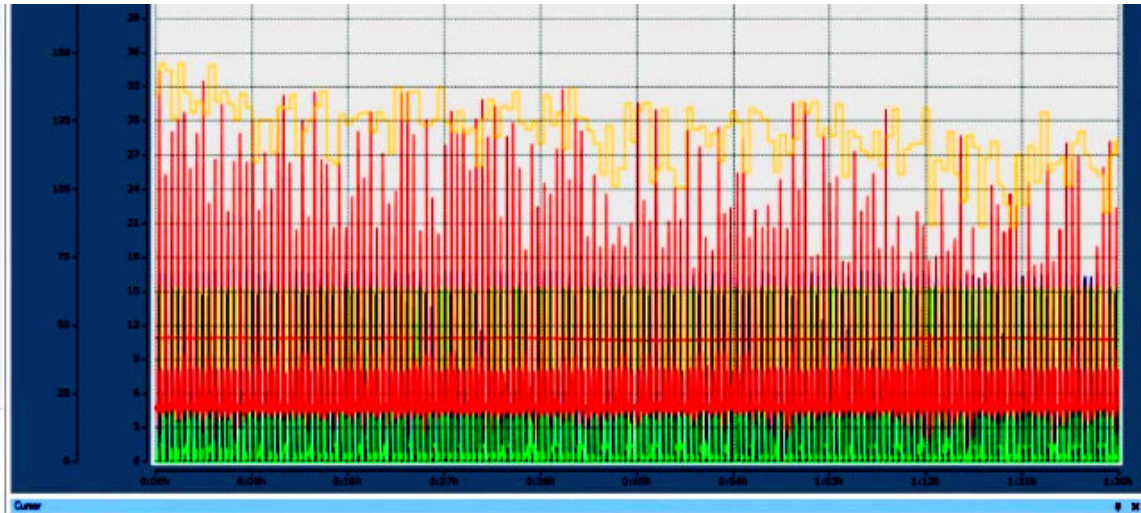


Abbildung 119: Analyse Leistungsspitzen im Scope

Der Schließdruck, die maximale elektrische Leistung und der maximale hydraulische Systemdruck sinken proportional zueinander. Jedoch zeigt der Graph, dass eine starke Veränderung des Schließdrucks zu einer nur mäßigen Veränderung des Hydraulikdrucks und einer leichten Veränderung der maximalen elektrischen Leistung führt. Die gewollte stärkere Reduzierung erfordert starke Eingriffe in den Prozess und eine starke Abweichung vom Soll-Schließdruck der Maschine. Die Versuchsreihen erfordern eine in dem Grundlagenteil beschriebene Qualitätsprüfung. Im Kapitel „Ausblick“ der Dissertation wird eine Maschinenfähigkeitsberechnung dieses Versuches vorgestellt.

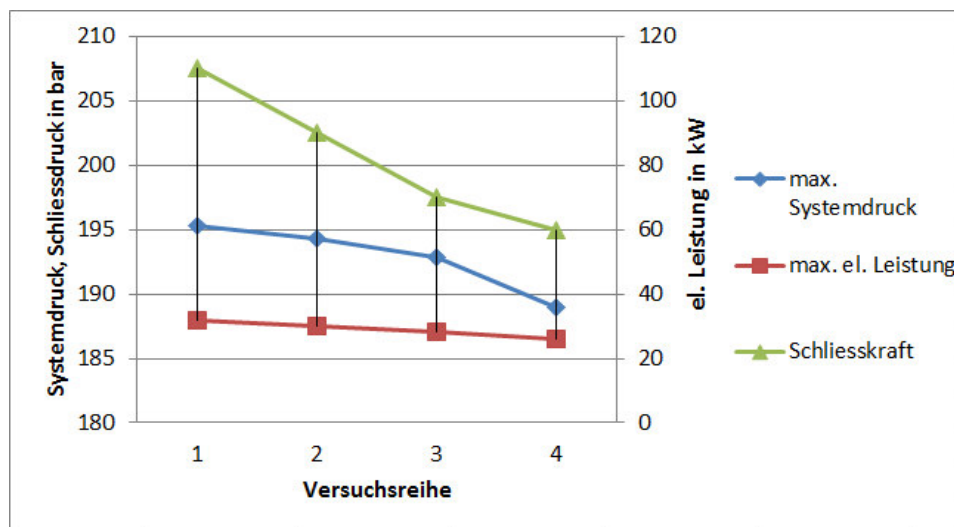


Abbildung 120: Zusammenhang Schließdruck, elektrischen Leistungsspitzen und Hydraulikdruck



### 10.3.2 Zusammenhang zwischen Kühlzeit, mittlerer Leistung und $\cos\varphi$

Im Ergebnisteil werden in der Graphik zum Schluss steigende Verläufe der mittleren Heizleistung und der mittleren Antriebsleistung pro Zyklus wahrgenommen. Die mittlere Heizleistung steigt wegen der schnelleren Produktionszeit durch die dann notwendige größere Wärmezufuhr etwas an. Die mittlere Antriebsleistung erhöht sich wegen der wegfallenden Kühlzeit (in der die Maschine wenig elektrische Leistung aufnimmt). Somit hat die Kühlzeit bei der Kumulation der Leistungswerte weniger Einfluss auf den Mittelwert und dieser driftet nach oben. Abbildung 121 aus der Scope Software zeigt die blaue steigende Kurve der mittleren Antriebsleistung, während die Zykluszeit (braune Kurve) durch die verringerte Kühlzeit ebenfalls reduziert wird.

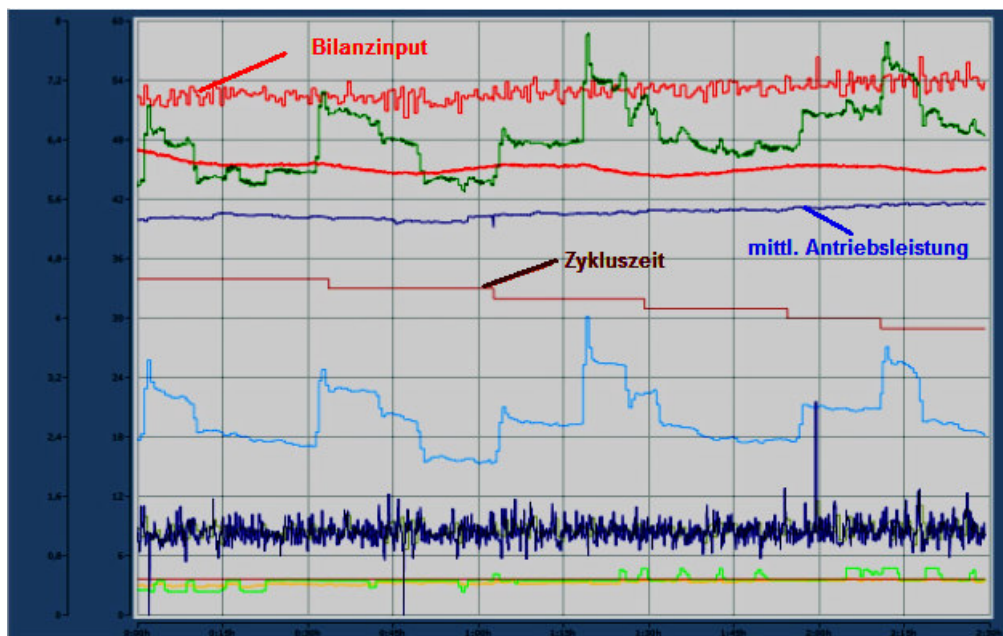


Abbildung 121: Zusammenhang zwischen Zykluszeit und mittlerer Antriebsleistung

Es lässt sich mit dieser Methode die Produktivität in Stück, d.h. auch die Ausbringungsmasse in kg pro Zeitabschnitt, erhöhen. Es sinkt mit abnehmender Zykluszeit auch der Energiewert pro Masse in kWh/kg.

Beispiel: Wird die Kühlleistung von 25s auf 20s wie im Versuch auf Seite 147 reduziert, verändert sich die Zykluszeit von 35s auf 30s. Weitere Tests wurden bis 25,5s Zykluszeit anschließend erprobt. Pro Stunde entspricht dieses bei vorherigen Einstellungen einer Ausbringungsmenge von 102Stück bei 35s Zykluszeit. Mit 19g Schussgewicht wird pro Kg umgerechnet Energie von 3,2kWh/kg benötigt. Bei 30s Zykluszeit können 120Stück produziert werden. Bei einer Schicht von 8 Stunden könnten



144Stück mehr Teile produziert werden (wenn keine Produktionsstörungen anfallen). Es werden 2,8kWh/kg bei der Produktion aufgewendet.

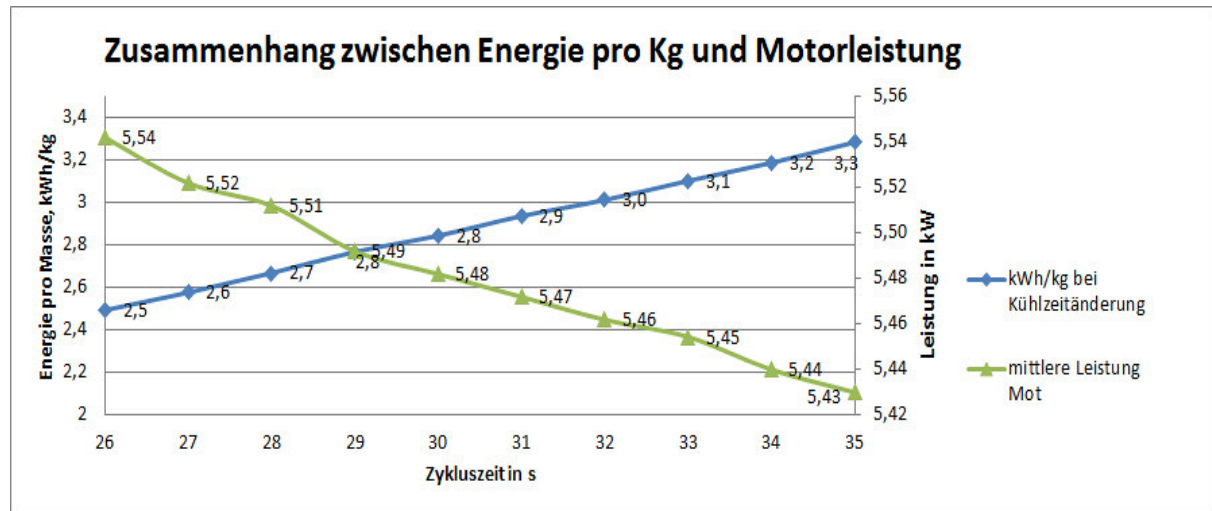


Abbildung 122: Zusammenhang zwischen Zykluszeit und Energieverbrauch pro Stück

Wird die Messreihe bis 26s Zykluszeit weiter reduziert (im Versuch wurde dieses probeweise ermittelt), sind bei dieser Maschine unsichere Produktionsabläufe feststellbar. Deshalb wird im Versuchsteil die eigentliche Messreihe bei 30s Zykluszeit beendet. Der effizienteste Energiewert pro Masse liegt mit dieser Messreihe bei 2,5kWh/kg

Abbildung 122 zeigt die zunehmende Energie pro Masse in kWh pro kg bei Vergrößerung der Kühl- und Zykluszeit in Sekunden. Wieder zu betrachten sind die Maschinenfähigkeit und die Maschinensicherheit des Verfahrens. Die Maschine muss weiterhin Gutteile und keinen Ausschuss durch zu kleine Kühlzeiten produzieren. Die o.g. Versuche werden mit Kunststoffformgebern (Einrichter zur Einstellung der Maschine) durchgeführt und die Teile werden auf ihre Qualität geprüft.

Der Prozess gestattet zur Effizienzverbesserung des elektrischen Inputs mehrere Eingriffe in seine Teilbereiche, welche beim Einspritzen und beim Plastifizieren schon vorgenommen wurden. In diesen Teilprozessen ist der  $\cos\varphi$ , d.h. der Anteil an Wirkleistung, sehr groß. Die Maschine wird nahe ihrer Nennlast betrieben.

In der Kühlzeit wird die Maschine nahe dem Leerlauf mit sehr schlechtem  $\cos\varphi$  betrieben<sup>50</sup>. Es wird ggü. der abgegebenen Wirkleistung ein hoher Blindleistungsanteil zur Magnetisierung der Spulen im Motor benötigt. Ziel einer Effizienzverbesserung soll es sein, die Maschine immer optimal ausnutzen zu können. Die Auswirkung der Reduzierung der Kühlzeit fordert die Maschine nun in kürzeren Abständen, somit verkürzen sich die Ruhephasen mit der schlechten Ausnutzung des Motors.

<sup>50</sup> Abbildung 150, S.238 im Anhang

### 10.3.3 Auswirkung der Durchflussänderung in der Form auf die abgegebene Kühlleistung

Durch die Durchflussänderung steigt die Flanschttemperatur etwas an. Dieses wirkt sich erst bei einem kleineren Durchfluss ab 1,8l/min stärker aus. Die beiden Infrarotmessungen zeigen die Flanschttemperatur (Temperatur an der Oberfläche) bei normalem voreingestellten Wasserdurchfluss von 4,2l/min bis 4,3l/min. Der Durchschnittswert des Infrarotbildes beträgt 25,2°C. Die Messung ist als kritisch zu betrachten, denn der Temperaturverlauf könnte durch die naheliegende Heizung beeinflusst werden.

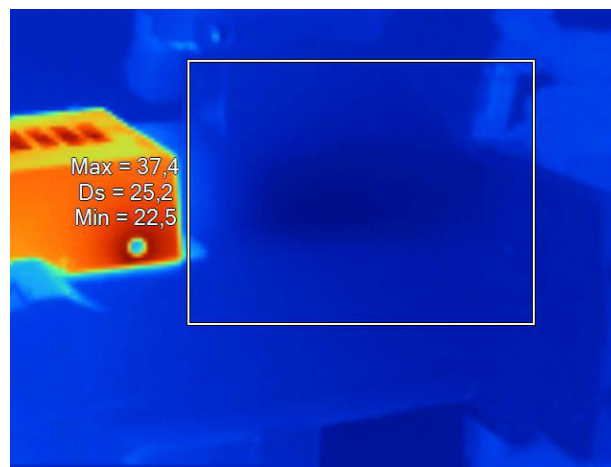


Abbildung 123: Infrarotbild Durchflussänderung Flansch, Flanschttemperatur vorher

Dass die Infrarotmessung, jedoch nach der Wasserreduzierung einen größeren Wert von 26,6°C, also eine Zunahme von 1,4°C anzeigt, lässt auf eine Beeinflussung der Temperatur und damit der Flanschkühlung durch Wasserreduzierung schließen. Die Temperaturzunahme im Flanschinneren wird auch mit einer SPS-Messung bestätigt und im Ergebnisteil behandelt.

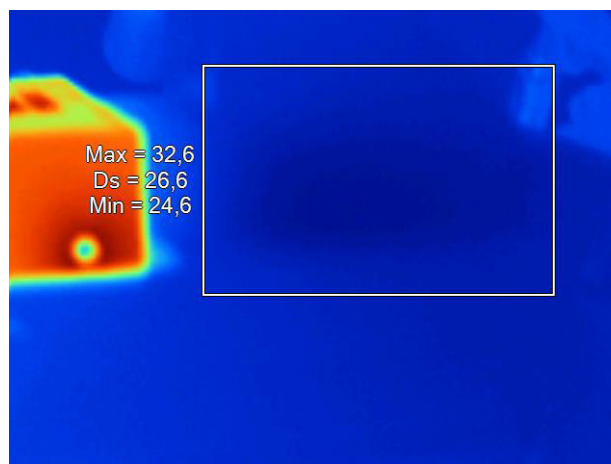


Abbildung 124: Infrarotbild Durchflussänderung Flansch, Flanschttemperatur nachher

## 10.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse der automatischen Analyse zur manuellen Parametererfassung

Im Ergebnisteil dieser Dissertation werden die Werte, ermittelt durch die SPS, vorgestellt und für die Analyse in Betracht gezogen. Die Werte müssen jedoch auf ihre Korrektheit überprüft werden. Zur Verifizierung wird neben den SPS Versuchsreihen eine Reihe von Daten extra aufgezeichnet. Die Werte werden durch einen Mittelwertbaustein eingelesen und abgespeichert. Daten wie Temperatur, Durchfluss und Druck, die in der SPS als Leistungs- oder Arbeitswert ausgerechnet und kumuliert werden, können so manuell eingetragen und auf Korrektheit überprüft werden.

Abweichungsanalyse Raumbilanz	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flanschkühlung in kW	Luftungskühlung in kW	Raumisolierung in kW	Heizleistung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
SPS	2,90	0,63	0,58	1,86	1,30	1,06	5,55	0,48	7,08	6,68	94%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	2,77	0,61	0,60	1,94	1,30	1,20	5,50	0,48	7,18	6,61	92%
SPS	2,77	0,68	0,61	1,91	1,30	1,19	5,50	0,48	7,17	6,66	93%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-11%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,89	0,61	0,54	1,85	1,30	1,00	5,48	0,48	6,96	6,65	96%
SPS	2,87	0,63	0,59	1,88	1,30	1,06	5,49	0,48	7,03	6,67	95%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-9%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 45: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse Raumbilanz (Tabellenauszug)

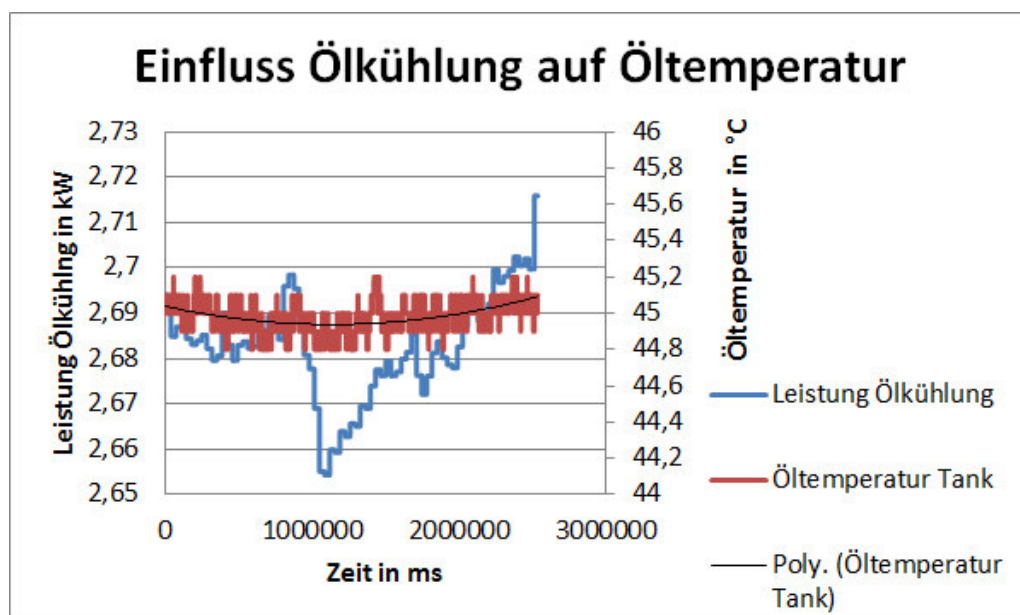


Abbildung 125: Einfluss Ölkühlung auf Öltemperatur

Die oben abgebildete Tabelle zeigt exemplarisch die Abweichungsanalyse der Raumbilanz. Die Abweichungen zeigen im Bereich der Form- und der Ölkühlung die prozentual größten Anteile. Es gilt nach der Ursache zu suchen. Die Ölkühlung verläuft bei den Messungen leider nicht immer synchron mit der Öltemperaturerhöhung. Das heißt, die Durchflussmenge wird sehr langsam und träge der Öltemperaturerhöhung nachgeregelt um einen optimalen Wert ausgehend von der Solltemperatur 45°C zu den später eingestellten Werten von 50°C und 55°C zu erreichen (Abbildung 125 verdeutlicht die Verzögerung).

Abweichungsanalyse Raumbilanz	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Lüftungs- leistung in kW	Raum- isolierung in kW	Heizleistung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
SPS	2,90	0,63	0,58	1,86	1,30	1,06	5,55	0,48	7,08	6,68	94%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	
Änderung Öl, Shell Tellus S4	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,00	5,38	0,48	6,86	6,76	98%
SPS	2,87	0,63	0,58	1,86	1,30	1,06	5,38	0,48	6,92	6,66	96%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,07</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>2%</b>	<b>-3%</b>	<b>-1%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	

Tabelle 46: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse bei Ölwechsel (Tabellenauszug)

Wird die Temperatur gesenkt, fährt das Ventil für die Ölkühlung weit über die eigentlich zu berechnende Sollgröße auf. Die Temperatur sinkt darauf auf einen Wert niedriger als die Solltemperatur. Das Ventil fährt darauf weiter zu (zu weit). Die Temperatur regelt sich mit der Zeit immer mehr ein. Dieses Verfahren der Ölkühlung ist technisch in diesen Versuchsreihen nicht anders machbar.

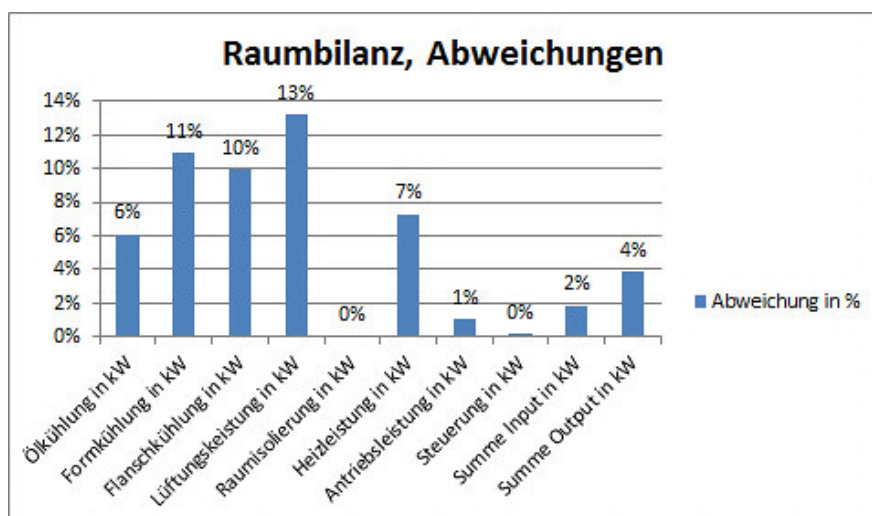


Abbildung 126: Abweichungsanalyse Raumleistungen

Bei der Formkühlung verursachen verhältnismäßig kleine Temperaturunterschiede große Abweichungen, da die Temperaturdifferenz im Gegensatz zur Ölkühlung unter 1°C beträgt. Bei der Ölkühlung sind es einige Grad Celsius.

Die Abweichungen der Einspritzarbeit sind bei dem Wärmestrom und der Förderarbeit der Haltepumpe am größten. Auch hier verursacht eine kleine Temperaturdifferenz eine große Änderung. Die Volumenströme schwanken auch während des Einspritzvorganges. Sie sind wegen des Schließvorganges fast gleich Null. Die Pumpe arbeitet ausschließlich auf Druck und nicht auf Menge. Die Menge wird über die Leckölleitung in den Tank gegeben. Das wird in der Ergebnisdarstellung nachgewiesen. Maßgeblich ist aber für diese Abweichung die Temperaturdifferenz. Zur genauen Messung werden PT100 und PT1000 Fühler eingesetzt. Außerdem treten Abweichungen bei der Konvektion der Pumpe auf. Bei der Messung der elektrischen Arbeit treten fast keine Abweichungen (aufgerundet nur 1%) auf.

Abweichungsanalyse Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Förd. Regelp. in kW/s	Förd. Haltep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Haltep. in kW/s	Lecköl Regelp. in kW/s	Lecköl Haltep. in kW/s	Konvektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Hydraulisch in kW/s	Spezifisch in kW/s	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73	69%
SPS	1,05	0,39	0,69	0,04	1,55	2,07	0,25	7,22	7,22	6,03	84%	0,78	0,73	69%
Abweichung in kW	0,01	0,00	0,01	-0,004	0,00	-0,04	0,01	-0,03	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00	0%
Abweichung in %	1%	0%	1%	-11%	0%	-2%	5%	0%	0%	0%	0%	-1%	0%	
Änderung Öl, Shell Tellus S4	1,00	0,39	0,68	0,03	0,95	1,95	0,26	6,55	6,55	5,28	81%	0,70	0,68	68%
SPS	1,01	0,36	0,69	0,04	0,98	1,97	0,26	6,6	6,6	5,31	81%	0,69	0,68	67%
Abweichung in kW	-0,01	0,03	-0,01	-0,006	-0,03	-0,02	0,00	-0,02	-0,02	-0,03	0,00	0,01	0,00	1%
Abweichung in %	-1%	9%	-1%	-20%	-3%	-1%	1%	0%	0%	-1%	0%	1%	0%	

Tabelle 47: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse Einspritzen

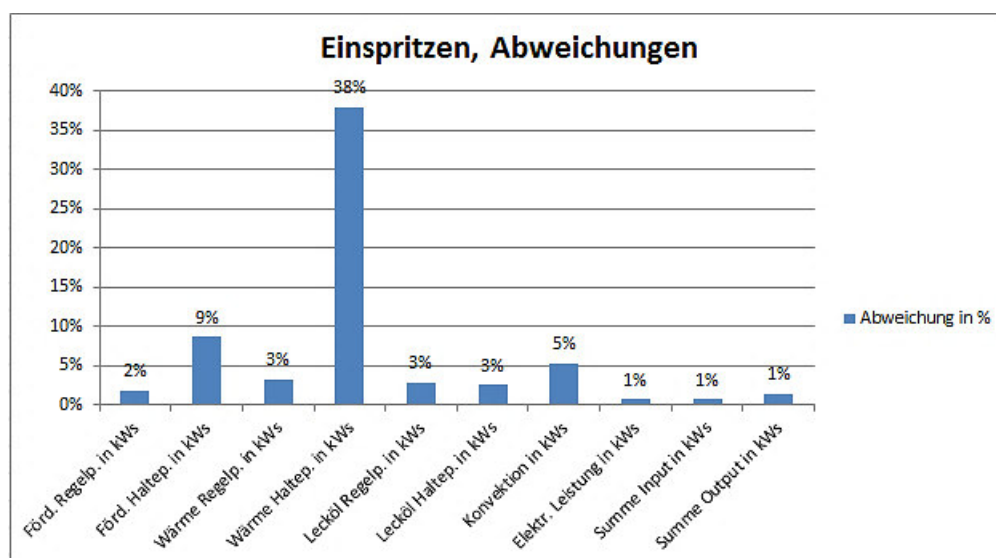


Abbildung 127: Abweichungsanalyse Einspritzen

Bei dem Vorgang der Plastifizierung werden ebenso die automatisierten und die manuell ermittelten Ergebnisse gegenübergestellt. Die Förderarbeit der Haltepumpe sowie ihre Wärmearbeit sind die größten Fehlerquellen. Auch hier kommen wieder die Schwierigkeit der Temperaturmessung und die Messung des Volumenstromes der Haltepumpe als Fehlerursache in Betracht. Die Messung ist auf Grund der begrenzten Ressourcen (der „Hydrotechnik“ Durchflussmesseinrichtung) nicht anders durchführbar und so hinzunehmen. Außerdem treten (wie auch beim Einspritzen) leichte Abweichungen bei der Konvektion und bei der Messung der Leckölströme von der Regelpumpe auf.

Abweichungsanalyse Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Förd. Regelp. in kW	Förd. Haltep. in kW	Wärme Regelp. in kW	Wärme Haltep. in kW	Lecköl Regelp. in kW	Lecköl Haltep. in kW	Konvektion in kW	Elektr. Leistung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW	Deckungsanteil %
Grundzustand PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06	84%
SPS	4,83	0,52	3,94	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	13,99	86%	4,06	84%
Abweichung in kW	0,03	0,05	-0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0%
Abweichung in %	1%	9%	0%	-3%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	
Änderung Öl, Shell Tellus S4	4,71	0,65	3,68	0,19	1,67	1,43	0,53	15,70	15,70	12,85	82%	3,94	84%
SPS	4,69	0,64	3,66	0,19	1,67	1,44	0,53	15,71	15,71	12,82	82%	3,94	84%
Abweichung in kW	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,03	0,00	0,00	0%
Abweichung in %	0%	1%	1%	-2%	0%	-1%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	

Tabelle 48: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse Plastifizieren

Die leichten Abweichungen der Messungen der Konvektion sind durch die unterschiedlichen Haltepositionen und auch Reflektionen der Infrarotkamera begründet. Nachgemessen wird mit dem Testo-Handgerät (mit Temperaturfühleraufsatz). Auch hier schwankt die Temperatur stark mit dem Wechsel der Positionierung um wenige Zentimeter. Die Messung der Oberflächentemperatur kann daher nur einen Richtwert für den Konvektionswärmestrom darstellen.

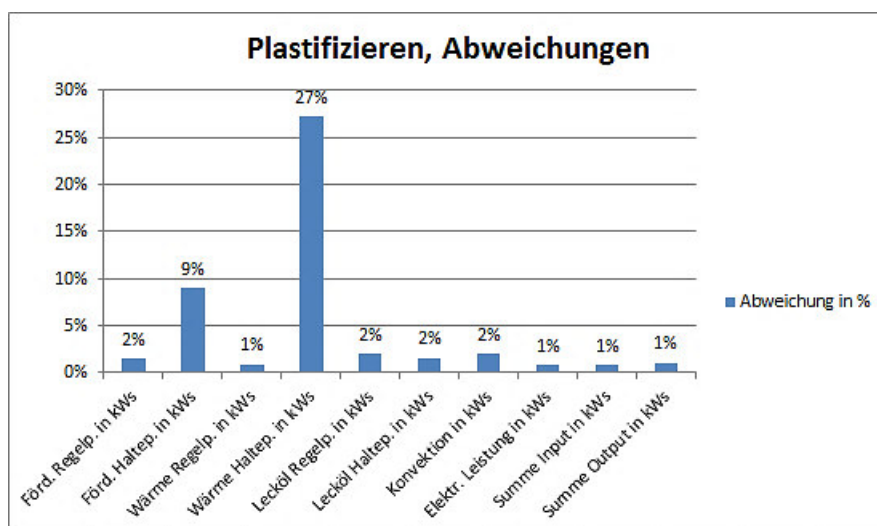


Abbildung 128: Abweichungsanalyse Plastifizieren

Weitere Informationen sind dem Anhang unter Punkt 13.11, S.218ff. in den Abweichungsanalyse-Tabellen zu entnehmen.

## 10.5 Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse

In diesem Teil wird auf die Richtigkeit der Ergebnisse der gesamten Arbeit eingegangen. Aus diesem Grund wird ein Auszug der Parametertabelle zur manuellen Ermittlung vorgestellt. Die kompletten Tabellen können dem Anhang unter 13.8 bis 13.10, Seite 212ff. entnommen werden. Es geht in diesem Teil vorerst darum die Methodik darzustellen.

### 10.5.1 Überprüfung der Deckungsanteile Raumbilanz

Die Deckungsanteile der Raumbilanz sind unter 100% und entsprechen damit dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik. Es kann keine Energie zusätzlich gewonnen werden. Es findet bei diesen Versuchen eine Energieumwandlung von elektrischer Arbeit in Bewegungs- und letztendlich in Wärmearbeit statt. Schließlich liegen die Deckungsanteile bei dem automatisierten wie auch bei dem vorher ausgeführten manuellen Verfahren alle über 90% und sind somit brauchbar.

### 10.5.2 Überprüfung der Deckungsanteile Einspritzen und Plastifizieren

Die Deckungsanteile der Prozessbilanz Einspritzen und auch Plastifizieren sind ebenfalls unter 100% und entsprechen damit auch hier dem Energieerhaltungssatz der Thermodynamik. Es kann durch das Einspritzen und Plastifizieren keine Energie zusätzlich gewonnen werden. Es findet speziell bei diesen Prozessabschnitten eine Energieumwandlung von elektrischer Arbeit in Pumpenförderungs- und schließlich in Wärmearbeit statt. Es liegen die Deckungsanteile im manuellen und im automatisierten Messverfahren bei ca. 88 bis 90%. Zur Verifizierung dient das Typenschild der elektrischen Maschine. Es werden hier die statischen Daten ohne Kontrollstand zur dynamischen Leistungsmessung verwendet. Andernfalls müssten Messwertgeber die abgenommene Leistung an der Motorwelle messen. Die Berechnung nach der Gleichung 2.14, Seite 28 im Grundlagenteil wird folgendermaßen durchgeführt:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \frac{P_{Nennlast}}{U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}} \quad (10.1)$$

$$\eta = \frac{18500W}{380 \cdot 37 \cdot 0,86 \cdot \sqrt{3}} = \frac{18500W}{20943W} = 0,883 \sim 88\%$$

Die Asynchronmaschine hat im Nennbetrieb einen Wirkungsgrad von 88%. Die Deckungsanteile der Prozessbilanzen Einspritzen und Plastifizieren liegen bei ca. 82 bis 85%. Die Abweichungen (Mehrwerte) liegen an den Messfehlern des Messsystems und der ungenauen Temperaturmessung sowie Zeitmessung bei dem manuellen Messverfahren. Die Maschine wird auch nicht kontinuierlich im Nennbetrieb bei 88% gefahren. Deshalb ist nur mit einem Wirkungsgrad von 85% zu rechnen. Abbildung 150 auf Seite 238 zeigt, dass der  $\cos \varphi$  bei den Vorgängen Einspritzen und Plastifizieren nur zwischen 0,4 und 0,5 liegt.

Bilanz Raummessung	Raum $T_{in}$	Raum $T_{aus}$	$T_{öl}$	$T_{in}$ Ölkühl	$T_{out}$ Ölkühl	Durchfluss Ölkühl	$T_{in}$ Formkühl	$T_{out}$ Formkühl	Durchfluss Formkühl	$T_{out}$ Flanschkühl	Durchfluss Flanschkühl	Leistungen			
												Deckungsan teil	Summe Output in kW	Summe Input in kW	
Grundzustand PPH9020	21,7	28,2	44,9	20,2	26,4	6,8	20,4	20,8	21,8	22,1	4,3		6,69	7,03	95%

Tabelle 49: Plausibilitätsprüfung Ergebnisse Raumbilanz

### 10.5.3 Überprüfung der Deckungsanteile Einspritzen und Plastifizieren

Die Versuche werden anhand der Reihenfolge in der bereits vorgestellten Modellbildung durchgesprochen.

Versuch 1: Der Grundzustand wird aufgenommen und mit der SPS ermittelt. Die manuelle Berechnung der Daten ermittelt Leistungsangaben in der gleichen Größenordnung. Die Messeinrichtung wird vorher im Versuchsteil mit Handmessgeräten und Volumenstrommessgeräten geprüft. Die Ergebnisse stimmen.

Versuch 2: Die Erhöhung der Heiztemperatur auf 225°C zeigt auch in den manuell ermittelten Daten eine Temperaturerhöhung (siehe vorhergehende Tabelle 49). Die Daten zu den Einspritzvorgängen und den Plastifizierungsvorgängen zeigen eine Verkleinerung der Outputgröße, der Einspritz- und Plastifizierarbeit. Die Messung wird im Grundlagenteil einer Verifizierung (numerischen Integration nach der Trapezregel mit vorhergehender Interpolation) unterzogen. Es wird eine Ausgleichsfunktion bestimmt und sogar die Daten manuell in einer Tabelle kumuliert. Die Daten müssen sich somit in die richtige Richtung bewegen (Tabelle 50, 51).

Bilanz Einspritzen	Förd. Regel $T_{out}$	Durchfluss Regel, Förd	Förd. Haltep $T_{out}$	$T_{öl}$	Durchfluss Haltep, Förd	Leck Regel $T_{out}$	Durchfluss Regel, Leck	Leck Haltep $T_{out}$	Durchfluss Haltep, Leck	Pumpe Durchfluss	Kornv. $T_{leert}$	pHy Regel	Arbeit		Einspritzarbeit		
													Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Hydraulisch in kWs	Spezifisch in kWs
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	46,8	13,1	46	1,1	45	70	2,1	58,5	5,1	58	48,5	7,19	6,02	84%	0,78	0,73	69%

Tabelle 50: Plausibilitätsprüfung Ergebnisse Einspritzen

Die Versuche 3 und 4: Die Erhöhung der Öltemperatur verursacht erst eine fallende, danach wieder eine steigende Inputgröße. Diese Daten lassen auf eine Verringerung und anschließend wieder Vergrößerung des Förder- und Wärmestromes schließen. Die manuell ermittelten Daten bestätigen diese Messung (Tabelle 50, 51).



Der Versuch 5 beschreibt den Einsatz der Isolierung. Durch eine messbare Veränderung der Raumtemperatur und eine Verringerung der Heizleistung (pro Zyklus) kann diese Änderung nachgewiesen werden.

Versuche 6 bis 8 verwenden ein anderes Material. Es wird von PP auf PE umgestellt. Die Ergebnisse sind in den Graphen 87 und 88 zusammengefasst. Die höheren Leistungen in der Raumbilanz sowie in den Prozessbilanzen (für die Anteile des Antriebs) lassen sich durch die Energieverbraucherhöhungen im Bereich der Förderströme und der Wärmeleistungen verifizieren. Die Anpassung des Ausgangswertes für eine leicht geänderte Kumulation (längerer Einspritzweg) wird in der vorhergehenden Analyse angesprochen.

Bilanz Plastifizieren	Förd. Regelp $T_{out}$	Förd	Durchfluss Regelp.	Förd. Haltep $T_{out}$	Durchfluss Haltep.	$T_{oil}$	Leck Regelp $T_{out}$	Leck	Leck Haltep $T_{out}$	Durchfluss Regelp.	Leck	Durchfluss Haltep.	Leck	Korv. $T_{korrt}$ Pumpe	pHy Regelp	Arbeit			Dosiermotor		
																Summe Input in kws	Summe Output in kws	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kws	Deckungsanteil %	
	in °C	in l/min	in °C	in l/min	in °C	in °C	in °C	in °C	in °C	in l/min	in °C	in l/min	in °C	in °C	in bar	kws	16,25	14,06	87%	4,06	84%
Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	47,6	24,7	48	0,8	45	71	1,5	57	2,4	58	59	16,25	14,06	87%	4,06	84%					

Tabelle 51: Plausibilitätsprüfung Ergebnisse Plastifizieren

Die Versuche 9 bis 12 und 13 bis 16 verwenden eine neue Art von Öl zur Energieeinsparung. Die Ergebnisse sind eine Reduzierung der mittl. Antriebsleistung durch verringerte Förderarbeiten und kleinere Leckölmengen. In den Prozessbilanzen kann dieses durch die Splittung in die Komponenten Einspritzarbeit und Plastifizierarbeit nachgewiesen werden. Die Leckölmengen verringern sich von 35ml auf 25ml bei Shell Tellus S4 und ebenfalls auf 25ml bei Mobil DTE10 Excel. Die geringeren Leckölströme werden anhand einer umfassenden bildlichen Dokumentation nachgewiesen. Die Versuche mit dem neuen Ölen zeigen außerdem leicht verkürzte Zykluszeiten (Tabelle 88, S.238) durch zum Teil steigende Durchflüsse der Regelpumpe.

Wird zur weiteren Überprüfung der Wirkungsgrad des Dosiermotors diskutiert, kann auch hier auf plausible Ergebnisse hingewiesen werden. Die Deckung beträgt hier ca. 82 bis 88%. Die Abweichung dieser Ergebnisse ist auf Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Dosierleistung zurückzuführen. Der Hersteller gibt für den Hydraulikmotor generell Gesamt-Wirkungsgrade zwischen 82 und 88% an.<sup>51</sup> Die Wirkungsgrade der Einspritzkolben liegen bei ca. 69 bis 71%. Auch diese Werte sind laut Hersteller realistisch. Die technische Ausstattung der Maschine ist beim Einspritzvorgang mit ineffizienten Komponenten ausgestattet, welche der Verbesserung bedürfen.

<sup>51</sup> zusammengesetzt aus hydraulisch-mechanischem und volumetrischem Wirkungsgrad [40]

#### 10.5.4 Abschließende Verifizierung für die Energieeinsparung der neuen Öle:

Das Datenmonitoring hat ergeben, dass sich die Zykluszeit bei der Verwendung der neuen Öle um ca. 100ms verkürzt. Bei einer Einstellung von 35s Zykluszeit sinkt diese im laufenden Betrieb auf 34,9s. Werden die Leistungs- und Arbeitstabellen untersucht und beispielsweise die Öle Shell Tellus S2 mit Shell Tellus S4 verglichen, fallen kleinere Förderarbeiten beim Einspritzen und Plastifizieren und auch eine kleinere Ausgangsarbeit (hydraulisch) als Bilanz-Output auf. Ein Blick in die Parametertabelle zeigt eine leichte Abnahme des Drucks beim Einsatz der neuen Öle. Der Durchfluss steigt dagegen leicht an. Aufgrund des geringeren Widerstandes im Hydrauliksystem durch energieeffiziente Öle kommen hier die leichteren Bewegungsabläufe zustande (die Regelpumpe regelt Druck zurück, die Zeit verkürzt sich minimal (fast nicht messbar). Durch den fallenden Druck ergibt sich aber eine geringere Förderarbeit und schließlich eine kleinere hydraulische Arbeit am Bilanz-Output.

#### 10.5.5 Einschätzung der Messfehler

Die in dieser Dissertation ermittelten Werte müssen unterteilt werden in zwei Kategorien:

- Daten führen zu wichtigen Unternehmensentscheidungen in Bezug auf Kosteneinsparungen
- Daten dienen der Forschung zur Ursachenfindung für diese Kosteneinsparung

Die Messungen der Leistungen aus der Raumbilanz dienen zur Untermauerung der theoretischen Grundlagen des ersten Hauptsatzes. Die fast vollständige Deckung der Energiebilanz zeigt auf der Outputseite deren richtig gemessene Temperaturen und Durchflüsse und die damit korrekt ausgerechneten Leistungs- und Arbeitsgrößen. Die Abweichungen in den Outputgrößen und die daraus resultierende Abweichung zwischen Input und Output von ca. 5% sind mit diesem Messsystem zu akzeptieren.

AC Kalibrierung, Leistung, U\* und I\* Eingang  
AC calibration, power, U\* and I\* input

Nr ID	Bereich Range	Test 1		Test 2	
		Eingestellte Größe Set value	Relativer Fehler Relative error	Eingestellte Größe Set value	Relativer Fehler Relative error
48	60.0 V / 600 mA	12.0 V / 120 mA	-0.040 %	60.0 V / 600 mA	0.005 %
49	60.0 V / 1.20 A	12.0 V / 240 mA	-0.041 %	60.0 V / 1.20 A	0.000 %
50	60.0 V / 2.50 A	12.0 V / 500 mA	-0.024 %	60.0 V / 2.50 A	0.007 %
51	60.0 V / 5.00 A	12.0 V / 1.00 A	-0.033 %	60.0 V / 5.00 A	0.004 %
52	60.0 V / 10.0 A	12.0 V / 2.00 A	-0.028 %	60.0 V / 9.00 A	0.004 %
53	60.0 V / 16.0 A	12.0 V / 3.20 A	-0.038 %	60.0 V / 9.00 A	0.004 %
54	6.00 V / 1.20 A	1.20 V / 240 mA	-0.024 %	6.00 V / 1.20 A	-0.002 %
55	12.5 V / 1.20 A	2.50 V / 240 mA	-0.026 %	12.5 V / 1.20 A	0.001 %
56	25.0 V / 1.20 A	5.00 V / 240 mA	-0.030 %	25.0 V / 1.20 A	0.000 %
57	130 V / 1.20 A	26.0 V / 240 mA	-0.031 %	130 V / 1.20 A	0.004 %
58	250 V / 1.20 A	50.0 V / 240 mA	-0.032 %	250 V / 1.20 A	0.002 %
59	400 V / 1.20 A	80.0 V / 240 mA	-0.030 %	400 V / 1.20 A	0.005 %
60	600 V / 1.20 A	120 V / 240 mA	-0.001 %	500 V / 1.20 A	0.006 %

Abbildung 129: Kalibriertabelle mit relativer Fehlerangabe el. Leistungsmessung

Die Input-Leistungsmessungen bei unterschiedlichen Parametern und die dadurch ermittelten veränderten Inputgrößen führen zu wichtigen Entscheidungen im Unternehmen in Bezug auf Umstellung der Hydraulikflüssigkeit. Der Messfehler dieser Untersuchungen sollte um ein vielfaches kleiner sein als die ermittelten Prozentwerte der Einsparungen. Andernfalls gäben die ermittelten Einsparungsdaten keinen Sinn. Die Strommessungen wurden vielfach wiederholt und auch in der Abweichungsanalyse sind nach Rundung die Abweichungen von weniger als 1% zu diskutieren. Der Hersteller des Messgerätes „ZIMMER“ gibt im Kalibrierprotokoll relative Abweichungen von 0,005% an.

Diese Abweichungen können für die Messungen in der Dissertation nicht ohne weiteres übernommen werden, da die Messumgebung (Sensorik, Messprozess) andere Parameter enthält. Deshalb wird auf eine eigene Verifizierung zurückgegriffen. Im Punkt 9.2.4 auf Seite 139 wird vor dem Öltausch eine erneute Messung mit 215°C Heizungstemperatur vorgenommen. Die elektrische Leistung im Maschineninput weist 5,56kW auf. In der Messung im Kapitel 9.1.1 (Seite 133) sind es 5,55kW. Das wäre eine Abweichung von ca. 0,2%. Diese Messabweichung wäre zu vertreten und nähert sich den Angaben im Kalibrierprotokoll.

Die analoge Eingangsklemme (0 – 10V) der Firma Beckhoff, die mit dem ZES an dessen Analogausgang verbunden ist, liefert laut Anleitung einen maximalen Fehler von 0,3% MBE. Dieser Fehler wird die Hauptursache für die o.g. Abweichung unter 1% sein.

Die Messung der Daten aus den Prozessbilanzen (Einspritzen und Plastifizieren) dienen zum einen ebenso der Untermauerung der Grundlagen des ersten Hauptsatzes, zum anderen aber auch der Ursachenerforschung für die o.g. ermittelten Einsparungen. Es sind Tendenzen in der Förder- sowie in den Leckölströmen zu erkennen, jedoch weisen die Messungen der Durchflussgrößen gerade im Bereich der Haltepumpe einen höheren Fehlerwert auf. Dieser ist aber auf Grund der kleinen Fördermenge zu akzeptieren. Die Ergebnisse sind plausibel und auf die Ungenauigkeiten im Messsystem zurückzuführen. Die Abbildung 58, Seite 90 deutet die Abweichung im unteren Messbereich der Turbinen schon an. Die blaue Turbine RE3 liefert für die Messung der Haltepumpenförderströme die besten Werte. Eine genauere Messung ist mit diesem Messsystem nicht möglich.

## **10.6 Zusammenfassung der Ursachen und Bewertungsmethodik**

Die Analyse behandelt die möglichen Ursachen für die Veränderung der Leistungswerte in der Raumbilanz und die Veränderung der Energiewerte in den Prozessbilanzen. Am Anfang werden die Ursachen beim Materialtausch auf die unterschiedlichen Fließzahlen von Polypropylen und Polyethylen aufgezeigt und damit das andere Fließverhalten an der Düse als Ursache für die

Erhöhung der Leistungs- und Energiewerte herausgestellt. Die Erhöhung der Öltemperatur zeigt bei höher gefahrenen Temperaturen eine Abnahme der Schmiereigenschaft als Ursache für eine Erhöhung der Leistungs- und Arbeitswerte bei der Bilanzierung. Die Bewegungsvorgänge werden schwerer und erfordern dadurch mehr Förder- und auch Wärmearbeit. So scheiden aus dem Hydrauliksystem größere Leckölmengen aus.

Bei den Energieeinsparmaßnahmen wird durch die Raumisolierung weniger Strahlungswärme an den Raum abgegeben, somit wird auch in der Raumbilanz durch Reduzierung der Raumlüftung diese Veränderung sichtbar. Die Verwendung neuer Öle zeigt bei dem synthetischen Energieeinsparöl durch ein günstigeres Luftabscheidevermögen und dadurch auch bei höheren Öltemperaturen den niedrigsten Energieverbrauch. Bei der Verwendung des mineralischen Energieeinsparöls ist dieser Vorteil auch zu erkennen, jedoch zeigen die Messwerte eine etwas niedrigere Einsparung gegenüber dem synthetischen Öl. Die verminderten Leckölmengen werden außerdem als Ursache bestätigt.

Die Verminderung der Leistungsspitzen ist auf die Veränderung des Schließdrucks zurückzuführen, denn die maximale elektrische Leistung und der maximale hydraulische Systemdruck sinken proportional zueinander. Die Ursache für die Leistungsspitzen liegt unter anderem an dem sehr hoch eingestellten Druck der Haltepumpe, welche für die Zuhaltkraft des Werkzeugs verantwortlich ist. In den letzten beiden Messreihen lassen sich mit der Durchflussreduzierung und der damit gewollten Erhöhung der Flanshtemperatur sowie der Reduzierung der Kühlzeit und der damit gewünschten Reduzierung der Zykluszeit beide Male brauchbare Produkte herstellen, welche durch positive Ergebnisse in der Qualitätsüberwachung bestätigt werden.

Die Plausibilität wird in allen Messreihen durch die Wirkungsgradgrößen der Asynchronmaschine, aber auch des Einspritzsystems und des Dosiermotors nachgewiesen. Es werden Abweichungen zwischen dem automatisierten und der manuellen Erfassung einzelner Parameter aufgezeigt, welche bei den Wärmeströmen der Haltepumpe durch die kleine Fördermenge während des Werkzeug-Schließprozesses am größten sind. Diese Abweichungen sind aber erklärbar. Inputseitig sind die Messfehler unter einem Prozent, was vom Messgerätehersteller bestätigt wird.

## 11 Nutzbarkeit der Ergebnisse, Erkenntnisse und Ausblick

### 11.1 Maschinenfähigkeit: Zufriedenstellende Produktqualität gewährleistet?

Neben der Funktion der Maschine bei den in den vorangehenden Versuchen genannten Parameteränderungen ist eine Beachtung der Produktqualität erforderlich. Dieses geschieht mit einer in den Grundlagen schon erläuterten statistischen Prozessbewertung. Die Produkte verlassen die Maschine nach dem Auswerfen durch den Schacht und werden nach einer kurzen Abkühlphase wie in der Steuerung der Maschine eingegeben, gewogen und abgemessen. Auf den Teil der Abmessungen wird im letzten Kapitel eingegangen. Sind die Produkte trotz Parameterveränderung brauchbar, nur dann erweisen sich die Versuche als nützlich.

Die Messergebnisse sollten zu einer Standardnormalverteilung führen. Wird das Innenmaß beispielsweise betrachtet, liegt der Mittelwert in der Abbildung 130 bei 2,9cm (beispielsweise vom Kunden gefordertes Maß). Aus der Toleranz ergeben sich die Eingriffsgrenzen UGW und OGW von 2,83cm und 2,97cm.<sup>52</sup> Unter Umständen sollte der Eingriff schon bei 2,85cm und 2,95cm erfolgen.

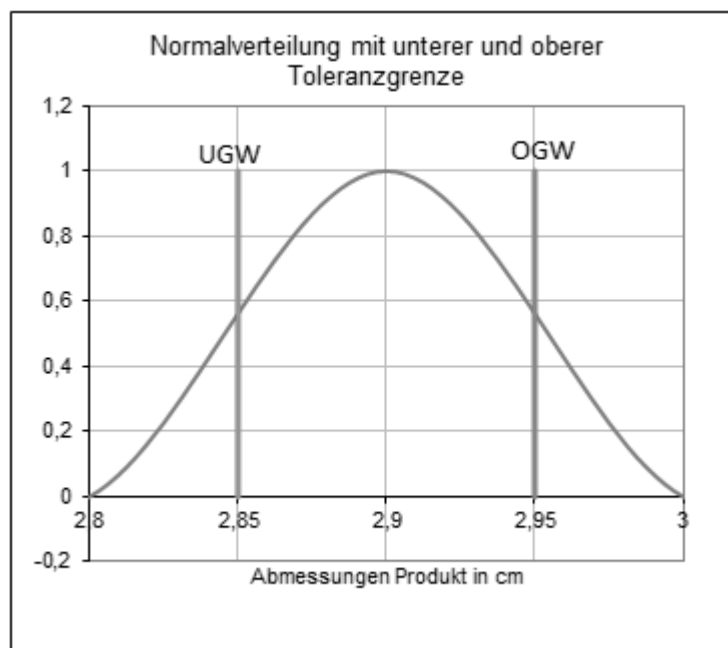


Abbildung 130: Standardnormalverteilung mit oberer und unterer Toleranzgrenze

Obige Abbildung stellt die Gaus-Kurve der Normalverteilung als Standard über dem Mittelwert dar. Zwischen den Grenzen UGW und OGW liegen für einen fähigen Prozess die meisten Werte. Ihre Anzahl wird in der folgenden Verteilungsgraphik angegeben:

<sup>52</sup> Die ausführliche Berechnung der Maschinenfähigkeit finden Sie unter Punkt 13.14 auf Seite 224f. im Anhang.

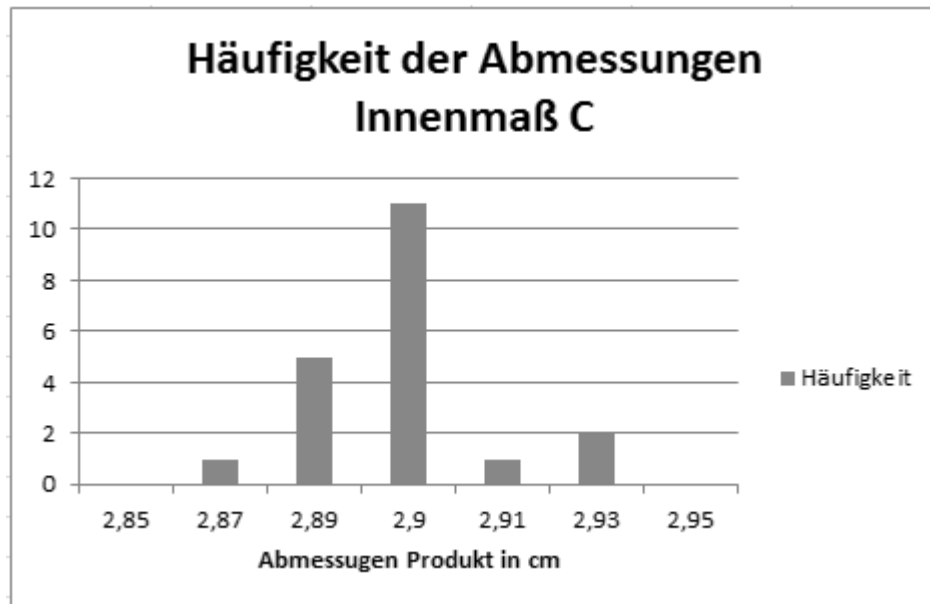


Abbildung 131: Häufigkeitsanalyse Innendurchmesser

Für das Innenmaß entfallen von 20 Stichproben 11 Stück auf den Mittelwert 2,9cm als den besten, vom Kunden gewünschten Wert. Fünf fallen auf einen kleineren Wert 2,89cm und in die andere Richtung fallen auf 2,93cm 2 Stück.

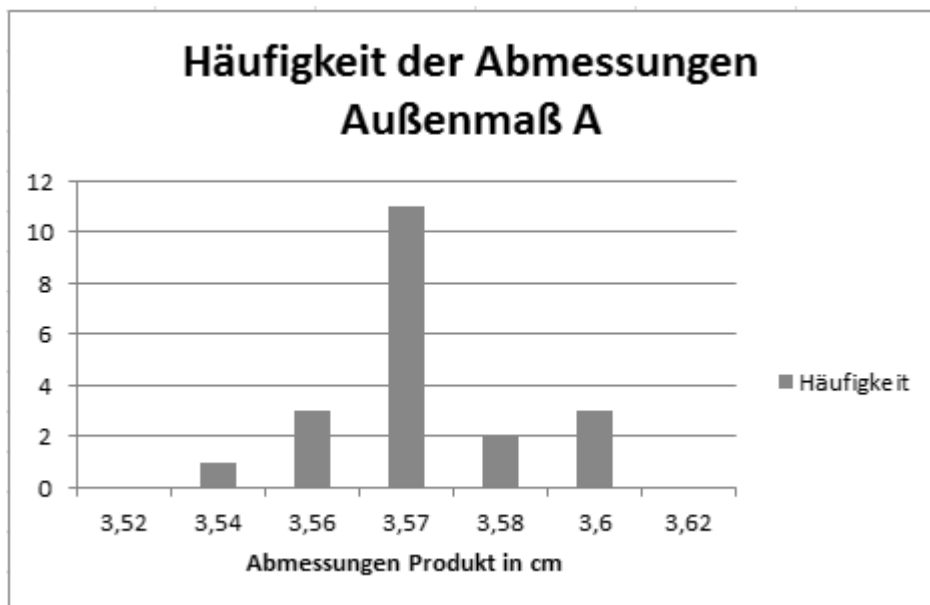


Abbildung 132: Häufigkeitsanalyse Außendurchmesser

Wird das Außenmaß (der größte Durchmesser des Produktes) betrachtet, fallen bei einer Stichprobenanzahl von ebenfalls 20 Stück auf 3,57cm 11 Stück. Den Durchmesser vom 3,56cm weisen drei Produkte auf und 3,58cm zwei Produkte. Es wird nun die Maschinensicherheit des Produktionsprozesses anhand der beiden Abmessungen untersucht. Die Standardabweichung beträgt 0,01 bei dem Innendurchmesser und 0,01 bei dem Außendurchmesser. Nach der in den

Grundlagen erläuterten Formel  $cmk = T/6 \cdot S$  ergibt sich für die kleine Abmessung ein Wert von 1,77 und für den großen Durchmesser ein Wert von 2,07. Die Werte sind beide größer als 1,67 und somit ergibt sich Maschinenfähigkeit im Sinne der Normalverteilung. Die Produkte sind also für den Kunden und somit für das Unternehmen brauchbar. Die Versuche durchzuführen macht Sinn. Es könnte durch die Einführung eines Standards im Sinne der kontinuierlichen Prozessverbesserung nur eine Verbesserung und keine Verschlechterung stattfinden.

## 11.2 Einführung eines Beispiels zur Durchflussreduzierung im Werkzeug als Anwendungsmethodik und –nützlichkeit

Mit der in den Vorversuchen ausgestatteten Versuchseinrichtung werden verschiedene Messungen des Wärmestromes der Formkühlung durchgeführt.

Ausgangspunkt: Problem bereitet in einer Produktionshalle eine zu große Durchflussmenge an Kühlwasser. Gemeinsam mit einer Arbeitsgruppe, der auch der Verfasser der Dissertation angehört, wird durch die im Labor aufgestellte Messeinrichtung das Werkzeug mit unterschiedlichen Volumenströmen gefahren.

Vorgehen: Simuliert werden verschiedene Querschnitte der Durchflussleitungen durch Verengungen im Wasserrücklauf der Formkühlung. Die Messungen werden dreimal mit dem gleichen Rohrquerschnitt durchgeführt und es werden die Vorlauf-/Rücklauftemperaturen insgesamt und für jeden Kühlkanal des Werkzeugs gemessen. Berechnet wird für jeden Kanal die Reynoldszahl. Diese sollte (in den Grundlagen beschrieben) für optimale turbulente Formkühlung über 10.000 liegen. In der Tabelle [16] sind die Werte dargestellt:

Messung vom 14.07.15		Versuch 1a	Versuch 1b	Mittel V 1	Versuch 2a	Versuch 2b
p Vorl. (Überdruck)	bar	3,55	3,54	3,55	3,60	3,59
p Rückl. (Überdruck)	bar	0,32	0,33	0,33	0,29	0,28
Vorlauftemperatur	°C	20,20	20,20	20,20	20,40	20,40
Rücklauftemperatur	°C	20,50	20,50	20,50	20,90	21,00
Volumenstrom 1 Kanal A	l/min	9,1	9,1	9,1	4,3	4,1
Drossel 1 Kanal A		-	-	-	2mm	2mm
Widerstand 1 Berechnung	bar/(l/min) <sup>2</sup>	0,04	0,04	0,04	0,18	0,20
Durchmesser Kühlkanal 1	mm	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Fließgeschwindigkeit 1	m/s	5,4	5,4	5,4	2,5	2,4
Reynoldszahl 1 Berechn.	-	32088,4	32088,4	32088,4	15162,7	14457,4
Rücklauftemperatur Kanal A	°C	20,5	20,6	20,6	21,1	21,1
Volumenstrom 2 Kanal B	l/min	7,6	7,6	7,6	4,0	4,0
Drossel 2 Kanal B		-	-	-	2mm	2mm
Widerstand 2 Berechnung	bar/(l/min) <sup>2</sup>	0,06	0,06	0,06	0,21	0,21
Durchmesser Kühlkanal 2	mm	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Fließgeschwindigkeit 2	m/s	4,5	4,5	4,5	2,4	2,4
Reynoldszahl 2 Berechn.	-	26799,1	26799,1	26799,1	14104,8	14104,8
Rücklauftemperatur Kanal B	°C	20,4	20,4	20,4	20,8	20,8

Tabelle 52: Auszug: Ergebnisse Messung Durchflussreduzierung

Das Ergebnis ist, dass durch die Reduzierung der Querschnitte auf 2mm die Reynoldszahl um fast die Hälfte reduziert werden kann und dennoch im turbulenten Bereich liegt. Wird eine weitere Reduzierung auf 1,5mm vorgenommen, liegen die Werte unter 10.000 und somit ist keine erfolgreiche Kühlung mehr gewährleistet.

Die Verkleinerung der Reynoldszahl kann anhand der Gl. 3.16 auf Seite 54 nun diskutiert werden. Die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  wird gebildet aus dem Durchfluss durch die jeweilige Querschnittsfläche in deren Berechnung der Rohrdurchmesser quadratisch eingeht. Die Durchmessergröße kürzt sich letztendlich zu  $1/d$  heraus. Würde ein konstanter Durchfluss angenommen werden, verhält sich die Reynoldszahl umgekehrt proportional zum Rohrdurchmesser. Hier in diesen Versuchsreihen wird aber der Rohrdurchmesser im Werkzeug zur späteren Lösungsumsetzung (ohne dann Veränderungen vornehmen zu müssen) so belassen, denn die Werkzeugkonfiguration soll in den Produktionsprozessen nicht verändert werden. Die Simulation der Querschnitte bezieht sich auf die eingesetzten Unterlegscheiben, welche den Durchfluss in den Rohrleitungen (vor oder nach dem Werkzeug!) reduzieren. Dieses wäre später durch elektronische Durchflussregelung vorzunehmen.

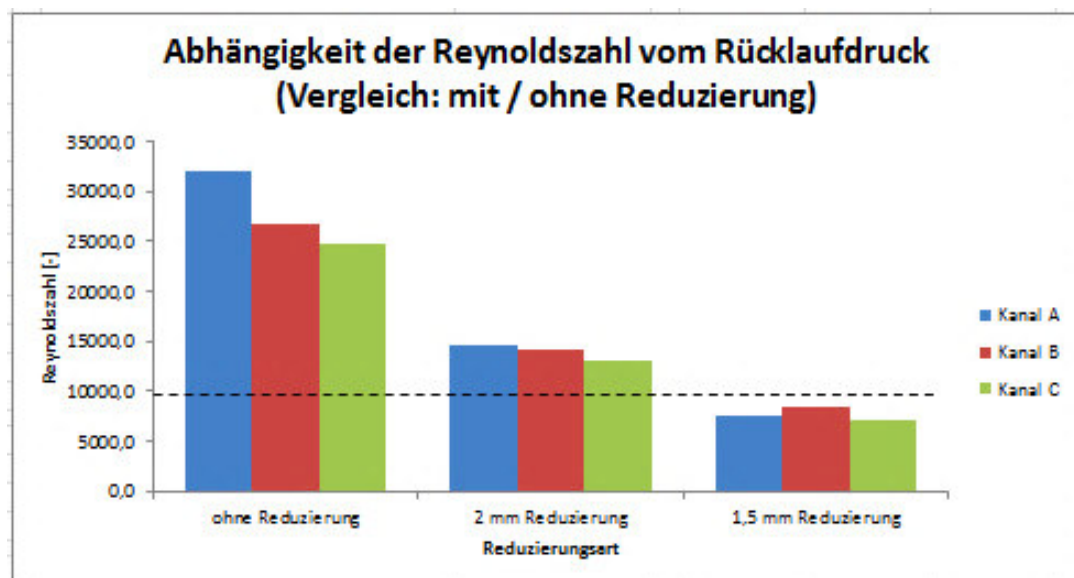


Abbildung 133: Abhängigkeit der Reynoldszahl von Durchflussreduzierung

Die Rohrleitungen (hier im Beispiel) des Rücklaufes aus dem Werkzeug werden durch o.g. Unterlegscheiben in ihrem Querschnitt reduziert und somit wird der Durchfluss im gesamten Formkühlkreislauf reduziert. Die Formel 3.16 (S.54) verdeutlicht wiederum, dass die Reynoldszahl proportional zur Strömungsgeschwindigkeit (d.h. proportional zum Durchfluss) ist.

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{5,36 \cdot 6}{1000 \cdot 1,003 \cdot 10^{-6}} = 32064 \quad (\text{bei } 6\text{mm Rohrdurchmesser, } v = 5,36\text{m/s})$$



$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{2,446 \cdot 6}{1000 \cdot 1,003 \cdot 10^{-6}} = 14633 \quad (\text{bei 6mm Rohrdurchmesser, } v = 2,446 \text{ m/s})$$

Somit kann bei gleichbleibendem Durchmesser des Werkzeugkühlwasserkanals, aber mit geringerem Durchfluss die Reynoldszahl reduziert werden ohne an dem Werkzeug selbst Veränderungen vornehmen zu müssen. Die Versuchsreihen werden auch an einer anderen Form durchgeführt und ähnliche Ergebnisse werden dokumentiert.<sup>53</sup> Nachfolgende Bilder zeigen die Temperaturerhöhung durch die Volumenstromreduzierung. Durch die in der Dissertation vorgestellte Messapparatur lassen sich Volumenströme und Temperaturen, d.h. Wärmeströme, digital aufnehmen und dokumentieren. Die Temperaturen am Werkzeug können somit gezielt beeinflusst und die Energieeffizienz ausschlaggebend verbessert werden.

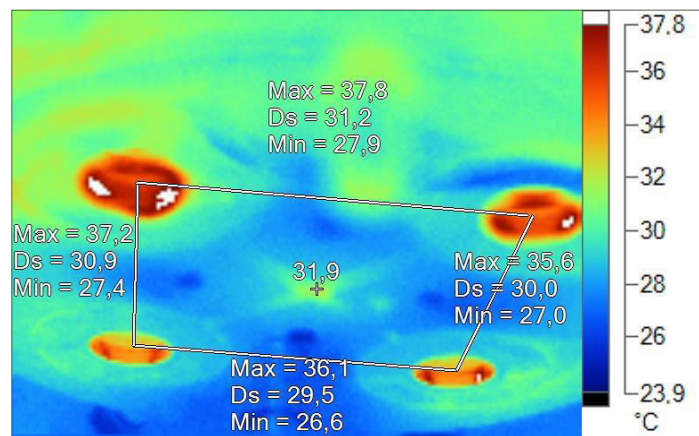


Abbildung 134: Temperaturen Werkzeug vor Durchflussreduzierung

Durch die Reduzierung auf 1,5mm kann der Messeinrichtung entnommen werden, dass die Reynoldszahl durch einen Wert unter 10.000 keine ausreichende Kühlung gewährleistet [16]. Dieses lässt sich durch die zu hohen Temperaturen an der folgenden Abbildung belegen. Es ist somit möglich ohne Gefahr die Produktionsbedingungen durch diese Methodik der Messaufnahme zu testen ohne im realen Produktionsbetrieb Versuchseingriffe vornehmen zu müssen.

<sup>53</sup> Die in der Arbeit beschriebene Regelung des Ölkühlkreislaufes könnte zu Lösung dieses Durchflussreduzierungsprojektes beitragen. Die Regelung erfolgt in diesem Falle über den gleichen Baustein der Temperaturregelung und wird nur mit andere Variablen verbunden: Die Formtemperaturfühler im Kühlwasser Vor- und Rücklauf als Inputvariablen sowie der Durchflussreglers als Outvariable für das Stellglied im Regelkreis.

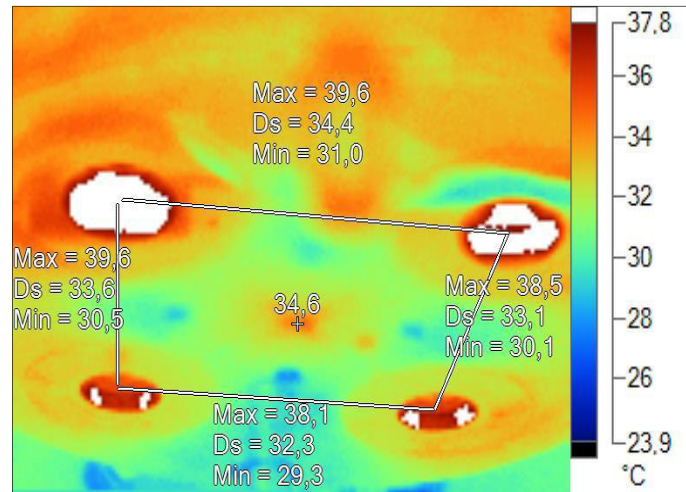


Abbildung 135: Temperaturen Werkzeug bei zu starker Durchflussreduzierung

### 11.3 Zeiteinsparung mit automatisierter Messmethodik

Um die Wirtschaftlichkeit der Automatisierung zu überprüfen, ist es notwendig die Prozesszeiten für die manuelle und die automatisierte Effizienzmessung zu analysieren. Zur Ermittlung der Prozesszeiten wird eine Zeitstudie durchgeführt, die mittels Zeitstudie durch eine Stoppuhr aufgenommen wird.

Der Messprozess wird sowohl bei der manuellen als auch bei der automatisierten Bewertung in Zeitabschnitte zur einfacheren Zeiterfassung eingeteilt.

Für die Automatisierung und auch für die Zeitstudie wird nur der eigentliche Analyseprozess in der PLC Software betrachtet. Umfangreichere Messung der vorhergehenden und folgenden Teilprozesse des Messprozesses und auch deren Zeitaufnahme würde auf Grund komplexer Programmiervorgänge über den Umfang dieser Arbeit hinausgehen.

Der Vergleich des manuellen und des automatisierten Bewertungsverfahrens liefert folgende Ergebnisse:

Das manuelle Bewertungsverfahren benötigt für eine Analyse eine Durchführungszeit von ca. 213 Sekunden. Das automatisierte Bewertungsverfahren benötigt mit der Makroanalyse eine Durchführungszeit von ca. 82 Sekunden. Das Öffnen der Software hat direkt bei dem Vergleich beider Verfahren keinen Einfluss, da dieser Schritt nur vor dem ersten Zyklus durchgeführt werden muss. Außerdem sind in beiden Verfahren Softwareapplikationen zu öffnen. Die Zeitstudie wird mit einer Anzahl von 20 Stichproben durchgeführt, um ein vertrauenswürdiges Ergebnis zu erhalten.

Vor der Automatisierung ergibt sich die folgende Zeitaufnahmetabelle auf der folgenden Seite:

Zeitart	Zuschlagsatz in %	Zeit in s	Zeit in min
<b>Zeitaufnahme</b>		<b>213,37</b>	<b>3,56</b>
$t_v$ (Verteilzeit)	0%	0,00	0,00
$t_{er}$ (Erholzeit)	0%	0,00	0,00
$t_e$ (Zeit je Einheit)		213,37	3,56
<b>T (Auftragszeit)</b>		<b>2133,71</b>	<b>35,56</b>

<b>Auftragsmenge in Stk</b>	<b>10</b>
-----------------------------	-----------

Tabelle 53: Manueller Prozess, Zeitaufnahme<sup>54</sup>

Wird eine Automatisierung angewendet, folgen die Ergebnisse in der unten aufgeführten Tabelle:

Zeitart	Zuschlagsatz in %	Zeit in s	Zeit in min
<b>Zeitaufnahme</b>		<b>82,20</b>	<b>1,37</b>
$t_v$ (Verteilzeit)	0%	0,00	0,00
$t_{er}$ (Erholzeit)	0%	0,00	0,00
$t_e$ (Zeit je Einheit)		83,40	1,37
<b>T (Auftragszeit)</b>		<b>822,04</b>	<b>13,70</b>

<b>Auftragsmenge in Stk</b>	<b>10</b>
-----------------------------	-----------

Tabelle 54: Automatisierter Prozess Zeitaufnahme<sup>55</sup>

Abschließend lässt sich feststellen, dass eine Automatisierung des Bewertungsverfahrens auf jeden Fall lohnenswert und wirtschaftlich ist, da durch die Automatisierung eine Zeitdifferenz von 130 Sekunden eingespart werden kann. Das sind 2min, die für andere Auswertungsschritte oder eine genauere Qualitätsprüfung der Gutteile zur Verfügung stehen. In der manuellen Effizienzmessung würde die Messung den Produktionszyklen schnell hinterher hängen und später wegen zunehmendem Leistungsdruck immer ungenauer. Die Komponenten Verteilzeit und Erholzeit werden für diese Zeitaufnahme vernachlässigt und mit 0% gleich 0s Dauer bewertet.

Die Anleitungen für die automatisierten Prozesse (Messprozesse, Flussdiagramme) entnehmen Sie bitte der Anhang der Dissertation der Zeitmessung, aber auch in jeder Zeitaufnahme ist der automatisierte Vorgang nach dem Flussdiagramm in der tabellarischen Übersicht links als „Vorgang“ dargestellt.

<sup>54</sup> Die detaillierte Zeitaufnahme kann dem Anhang unter 13.15.1, S.226f. entnommen werden.

<sup>55</sup> Die detaillierte Zeitaufnahme kann dem Anhang unter 13.15.2, S.228f. entnommen werden.

## 11.4 Verwendbarkeit der Ergebnisse der Dissertation

Durch die Ergebnisse dieser Dissertation lässt sich eine Methodik für eine Effizienzmessung exemplarisch an einer Spritzgießmaschine herleiten, umsetzen und die Möglichkeiten einer automatisierten Effizienzmessung können geprüft und umgesetzt werden.

Die Methodik zur Energiebestimmung wird detailliert aufgezeigt, in zwei Teilprozesse aufgeteilt, in die darin enthaltenen Energiekomponenten heruntergebrochen und deren Wertigkeit bewiesen.

Die Dissertation befasst sich mit der Thematik die Energieflüsse einer Spritzgießmaschine mittels Versuchseinrichtung exemplarisch zu spezifizieren um die Fragen zu beantworten, welchen Weg die Energieflüsse nehmen und in welcher Größenordnung sie sich bewegen. Es wird herausgestellt, wie die elektrische Energie in Form von elektrischer Einspritz- und Plastifizierarbeit als wichtige Bestandteile des Spritzgießprozess anschließend im hydraulischen Pumpensystem aufgespalten werden in ihre Teilkomponenten Förder-, Wärme-, Lecköl- und Konvektionsarbeitsgrößen. Es werden Beweise für die Ermittlung dieser Energieformen aufgezeigt.

Für den Betrieb maßgeblich ist die Untersuchung von Einsparpotentialen an der Maschine (durch technische Veränderung und durch Veränderung der Parameter am Spritzgießprozess). Somit können die mittlere Zykluszeit an sich und die davon abhängigen mittleren Leistungen (als Bilanzinput) durch Veränderung der Arbeitsströme in den Prozessbilanzen, hervorgerufen durch Parameterveränderungen, gesenkt werden. Beispiele hierfür sind die späteren Versuchsreihen: Der Öltausch, die Isolierung der Heizung. Methodisch werden die Einstellparameter mitgeschrieben und können in Relation gesetzt werden.

Weitere wichtige Erkenntnisse sind, dass die Stromspitzen der Maschine laut Ergebnissen der Versuchsreihen parameterabhängig sind und gesenkt werden können. Es kann außerdem die Leerlaufleistung erfasst und gesenkt werden. Exemplarisch kann für diese Spritzgießmaschine durch eine allgemeingültige Methodik die Abgabe der Wärme ans Pumpenhaus größentechnisch erfasst und sogar gesenkt werden. Durch die Verwendung neuer Hydraulikflüssigkeiten lassen sich FÜR DIESE MASCHINE Einsparpotentiale erkennen. In einem Beispiel wird anschließend eine Amortisation von ein bis zwei Jahren berechnet.<sup>56</sup>

---

<sup>56</sup> Die Berechnung wurde vom Autor firmenintern an einem Beispiel simuliert und bei der Verteidigung dieser Arbeit vorgestellt!

## 11.5 Ausblick auf neue Themen

In den Grundlagen werden neue Maschinent Technologien beschrieben. Diese könnten mit den hier beschriebenen Messmethoden auf Ihre Energieeffizienz geprüft werden. Fragen nach der Aufteilung der Energieflüsse zu den Maschinenkomponenten bei neuen Technologien könnten untersucht und bewertet werden. Antworten auf den Energieverbrauch mit neuen effizienteren Hydraulikölen (Vergleich zwischen Standardölen und synthetischen Ölen) könnten gefunden werden.

Die Veränderungen der Leistungen im Raum sind bei neuen Maschinen (der Hybridtechnologie und der Elektromaschinen) zu untersuchen. Das betrifft die Fragen nach der Spitzenlast, deren Beeinflussung und der Leerlaufleistung, die in dieser Arbeit für eine vollhydraulische Maschine diskutiert werden.

Wird die vollhydraulische Maschine weiterbetrachtet, können andere Teilprozesse analysiert werden. Im Vordergrund können der Schließ- und Öffnungsvorgang um gerade die Leistungsspitzen genauer zu untersucht werden. Weitere Maschinenkomponenten wie der Auswerfer, aber auch Handlingkomponenten können auf ihre Effizienz untersucht werden. Hinzukommen würde die Druckluftenergie, eine weitere in der Arbeit nicht im Vordergrund gerückte Komponente. In Produktionsstätten werden wegen großer Mengen diese Apparaturen eingesetzt und Personalkosten reduziert. Die Komponente „Druckluft“ ist bei der in dieser Dissertation behandelten Maschine nicht notwendig, in der Produktion aber öfter vorhanden. Die Produktionshallen der kunststoffproduzierenden Gewerbe hängen oft alle an einer Druckluftzentralleitung mit einem überwachenden Druckluftmanagement.

Letztendlich kann mit der in dieser Dissertation vorgestellten Methodik der Energieverbrauch auf eine Halle mit Spritzgießmaschinen übertragen werden. Für die Auslegung von Produktionshallen (maschinen- und versorgungstechnisch, aber auch gebäudetechnisch) können diese Aspekte in weiterführenden Arbeiten betrachtet werden.

## 12. Fazit

In der Dissertation wird eine Energieeffizienzmessung an einer Arburg Kunststoff-Spritzgießmaschine 320M-850 exemplarisch beschrieben. Nach einer genauen Kalibrierung der Messsensoren und eines genauen Abgleichs der Durchflussturbinen an dem Pumpensystem werden die Messungen zur Erfassung der Raumbilanz und gleichzeitig die beiden Prozessbilanzen durchgeführt. Die Daten der vollständigen Deckung der Energiebilanz bestätigen sich.

In dieser Arbeit wird eine Methodik entwickelt, um Energieströme und die Energieeffizienz dieser o.g. Maschine zu bestimmen, mit dem Ziel die Energieeffizienz zu verbessern und demnach die Energiekosten zu senken. Die plausible Darstellung der Energieströme einer Energiebilanz vom Input bis zum Output wurde an einer Spritzgießmaschine in diesem Umfang noch nicht wissenschaftlich nachgewiesen.

Es stellt sich heraus, dass die Isolierung der Heizung eine Veränderung in der Raumbilanz hervorruft. Die elektrische Leistung sinkt bei dieser Maschine um 10% (ausgehend von der Heizleistung selbst) und die Raumlüftungsleistung an der Bilanzausgangsseite sinkt um einen annähernd gleichen Betrag.

Durch den Einsatz dieser Öle verringert sich die Antriebsleistung, also der gesamte Input, um zwei bis drei Prozent. Dieses wird auch mit dem vorher eingesetzten Standardöl bei höheren Öltemperaturen über der 45°C Vorgabetemperatur erreicht. Gefahren wird bis 55°C. Die Leistungs- und Arbeitswerte verhalten sich bis 50°C weitgehend stabil. Die Leckölströme sind sogar bei dem Einsatz der neuen Öle um ca. 30% gesunken. Dieses wird anhand einer manuellen Volumenstrommessung bestätigt.

Die Veränderung der Leistungsspitzen und der mittleren Antriebsleistung bilden den Abschluss des Versuchsteils. Durch die Verringerung der Schließkraft des Werkzeugs auf die Hälfte des Ursprungswertes werden die Leistungsspitzen um ca. 25% gesenkt. Die Ausbringungsmenge der Maschine kann durch eine Verringerung der Kühlzeit um ca. 15% gesteigert werden. Somit können deutlich mehr Teile produziert werden bei gleichbleibender Qualität. Während dieser Versuchsreihen wird eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung der produzierenden Teile durchgeführt.

Durch die Verwendung neuer Hydraulikflüssigkeiten lassen sich FÜR DIESE MASCHINE Einsparpotentiale erkennen. Andere Maschinen könnten auf diese Erkenntnisse hin untersucht werden.

## 13. Anhang

### 13.1 Glossar

#### Asynchronmaschine (ASM)

Eine Asynchronmaschine ist ein elektrischer Motor und dient zum Antrieb von elektrischen Anlagen. Durch eine Feldänderung des Magnetfeldes wird im Läufer eine Spannung induziert, welche der Ursache entgegen wirkt. Zwischen dem Ständerdrehfeld und dem Läuferdrehfeld ist eine Abweichung (Schlupf) vorhanden, welche den Läufer durch Induktion antreibt. Wären beide Drehfelder gleich, würde keine Spannung im Läufer induziert werden und die Maschine würde still stehen.

#### Blindleistung

Blindleistung ist ein Teil der Scheinleistung, die ein induktiver Verbraucher benötigt. Sie wird bestimmt durch den Blindleistungsfaktor  $\sin \varphi$ . Eine weitere Komponente neben der Blindleistung ist die Wirkleistung.<sup>57</sup>

#### Dehnmessstreifen

Die Dehnmessstreifen dienen zur Torsionsmessung auf der Torsionsmesswelle im digitalen Messwertgeber. Die Dehnmessstreifen sind in einer Messbrücke verschaltet. Durch die Torsion verändern sich die Widerstände der Dehnmessstreifen und der Spannungsabfall der Messbrücke.

#### Dosiermotor

Der Dosiermotor ist der Antrieb der Schnecke bei einer Spritzgießmaschine. Durch ihn dreht sich die Schnecke mit einer bestimmten Drehzahl. Diese wird unter dem Punkt „Dosiergeschwindigkeit“ in der Maschinensteuerung eingestellt.

---

<sup>57</sup> Sehen Sie dazu Glossar unter Scheinleistung und Wirkleistung.

### Elektrostatische Entladung [84]

„Die elektrostatische Entladung entsteht durch eine hohe Potenzialdifferenz in elektrisch isolierendem Material und äußert sich durch Funkenüberschlag zu elektrisch leitfähigen Materialien. Die Potenzialdifferenz entsteht zumeist durch Reibung (Reibungselektrizität) z.B. das Laufen auf Kunststoffoberflächen (Fußbodenbelägen, Teppichen o.ä.)[...].“

### Flansch

Der Flansch befindet sich unterhalb des Massetrichters der Spritzgießmaschine und ist der Zulauf für die Masse (Granulat) sowie die Halterung und Ummantelung für die Schnecke am hinteren Ende. Durch ihn fließt der Kühlwasserstrom, der verhindert, dass das Material beim Eintreten in die Plastifizierungszone überhitzt.

### Haltepumpe

Die Haltepumpe befindet sich am äußeren Ende als zweite, kleinere Pumpe des Zwei-Pumpensystems der Spritzgießmaschine. Es handelt sich um eine Radialkolbenpumpe, welche die Zylinder senkrecht zur Achse angeordnet hat. Durch zwei Stellschrauben lassen sich Druck und Menge an der Pumpe einstellen. Die Pumpe ist verantwortlich für den Zuhaltedruck des Werkzeugs.

### Kompensationswiderstand

Der Kompensationswiderstand ist ein Dehnmessstreifen, der zum Ausgleich der Messbrücke bei Veränderungen der Temperaturen führt. Durch Temperatureinwirkung ändern sich die Widerstände Dehnmessstreifen. Es sich der Spannungsabfall in der Messbrücke. Der Kompensationswiderstand wirkt dieser Veränderung entgegen.

### Leistungsfaktor

Der Leistungsfaktor  $\cos\varphi$  ist verantwortlich für den Anteil an Wirkleistung in einem Drehstromsystem. Sie stellt den Anteil der nutzbaren Leistung eines induktiven Verbrauchers dar.



### Luftabscheidevermögen

Das Luftabscheidevermögen [87] bezeichnet den Wert in Minuten, bei dem eine dispergierte Luft im Öl wieder auf den Restgehalt abgeschieden ist. Das LAV (Luftabscheidevermögen) ändert sich mit der Gebrauchsdauer des Öles, wenn Verunreinigungen und Verschmutzungen auftreten. Durch Blasenbildung entstehen sog. Dieseleffekte, welche durch Kavitation eine einwandfreie hydraulische Funktion nicht mehr gewährleisten.

### MAK-Wert

Der MAK-Wert (MAK = maximale Arbeitsplatzkonzentration) ist die höchstzulässige Konzentration eines Gefahrstoffes (Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft) am Arbeitsplatz, die im Allgemeinen die Gesundheit des Arbeiters nicht beeinträchtigt.

### Messbrücke

Die Messbrücke, bestehend aus den Komponenten Dehnmessstreifen, dem Kompensationswiderstand und einem Manganin-Ausgleichsdraht. Sie dient zur Messung der Torsion durch Erzeugung eines Spannungsabfalls zwischen zwei Punkten je nach Torsionseinwirkung.

### PLC Control

PLC Control ist die Software-Programmierungsmaske des SPS-Beckhoff Systems. In dieser Anwendung werden die Programme in einer bestimmten Programmiersprache geschrieben und ausgeführt.

### Regelpumpe

Die Regelpumpe ist die größere der beiden Pumpen des Hydrauliksystems einer Spritzgießmaschine. Sie ist eine Axialkolbenpumpe und verantwortlich für den Systemdruck Hydraulik. Dieser Pumpenkreislauf versorgt das Einspritzsystem und den Dosiermotor zur Plastifizierung.

### Restriction of certain Hazardous Substances (RoHS)

Die Restriction of certain Hazardous Substances regelt die Beschränkung der Verwendung gefährlicher Stoffe.

### SCOPE View (Beckhoff)

Die Software Scope dient dem Datenmonitoring der aus den Versuchen ermittelten Daten. Diese lassen sich damit in eine Excel Datei einfügen und auch direkt im Scope visuell darstellen. Mit der Software kann direkt auf die Variablen zur Datenerfassung zugegriffen werden.

### SPS-Messsystem

SPS-Messsystem beschreibt in dieser Arbeit das automatisierte Messsystem zur Messung der Größen Temperatur, Druck, Durchfluss und Wegwerten der Maschine und des Versuchslabors. Bestandteile sind hier die SPS-Messklemmen, die CPU und die Sensorik an der Maschine.

### Scheinleistung

Die Scheinleistung ist die verbrauchte Leistung in einem Drehstromsystem und besteht aus den Komponenten Wirkleistung und Blindleistung. Der Blind- und der (Wirk-)Leistungsfaktor bestimmen die jeweiligen Anteile.<sup>58</sup>

### Systemmanager

Systemmanager ist die Hardwareanwendung zur Einstellung und Kontrolle der Messklemmen in einem SPS System. Es lassen sich hier die Messklemmen mit ihren Ein- und Ausgängen mit ihren Variablen verknüpfen und auch Parameter der einzelnen Klemmen einstellen.

---

<sup>58</sup> Bitte entnehmen Sie dazu die Erklärungen zu Wirk- und Blindleistung in diesem Glossar auf Seite 195.

### Trennverstärker (Knick Varitrans P15000)

Der Trennverstärker dient der galvanischen Trennung zwischen Maschinensteuerung und SPS-Messsystem. Außerdem lässt sich durch ihn eine Messung parallel zur Maschinensteuerung ohne gravierende Beeinflussung des Messergebnisses realisieren. Der große Eingangswiderstand des Verstärkers wirkt sich bei Parallelschaltung zum Weggeber auf die Maschinensteuerung nur mit einem sehr kleinen Messfehler kleiner als 1% aus.

### TWIN Cat Software

Die TWIN Cat Software ist die von der Firma Beckhoff vorgestellte Software zur Programmierung und Konfiguration des SPS-Messsystems. Enthalten sind die Komponenten PLC-Control und Systemmanager. Weitere Komponenten werden in dieser Arbeit nicht angesprochen.

### Waste Electrical and Electronic Equipment

Die Waste Electrical and Electronic Equipment regelt Rücknahme und Recycling von Elektronikprodukten unter Vorgabe von Recyclingquoten für die Hersteller.

### Wirkleistung

Die Komponente Wirkleistung ist ein Teil der Scheinleistung und wird bestimmt durch den Leistungsfaktor  $\cos\varphi$ . Sie ist die nutzbare Leistung in einem Drehstromsystem und wird in dieser Arbeit als Bilanz-Input gesehen.

### ZES-Messgerät

Das ZES Messgerät dient in dieser Arbeit zur Messung der elektrischen Leistung. Die Spannung wird parallel zur Stromleistung auf jeder Phase abgegriffen. Der Strom wird durch Strommessspulen um den einzelnen Phasen abgegriffen und im ZES Messgerät werden die aus den Spulen kleinen Ströme in große Anzeigewerte umgewandelt. Das Signal wird mit den am ZES eingebauten analogen Spannungsausgängen auf eine Spannungseingangsklemme (0-10V) des SPS-Messsystems gegeben.

## Zuhaltekraft

Die Zuhaltekraft ist die für das Zuhalten nach dem Schließvorgang des Werkzeugs verantwortliche Kraft. Sie wird werkseitig in der Einheit „bar“ bei der in dieser Arbeit verwendeten Labormaschine angegeben (physikalisch nicht korrekt, da sie in der Einheit kN angegeben werden müsste). Der Zuhaltedruck wird durch die Haltepumpe in das Hydrauliksystem gegeben und ist an einem Stellventil einstellbar.<sup>59</sup>

---

<sup>59</sup> Informationen entnehmen Sie Kapitel 8.5.2 auf Seite 130

## 13.2 Hydraulikplan Spritzgießmaschine

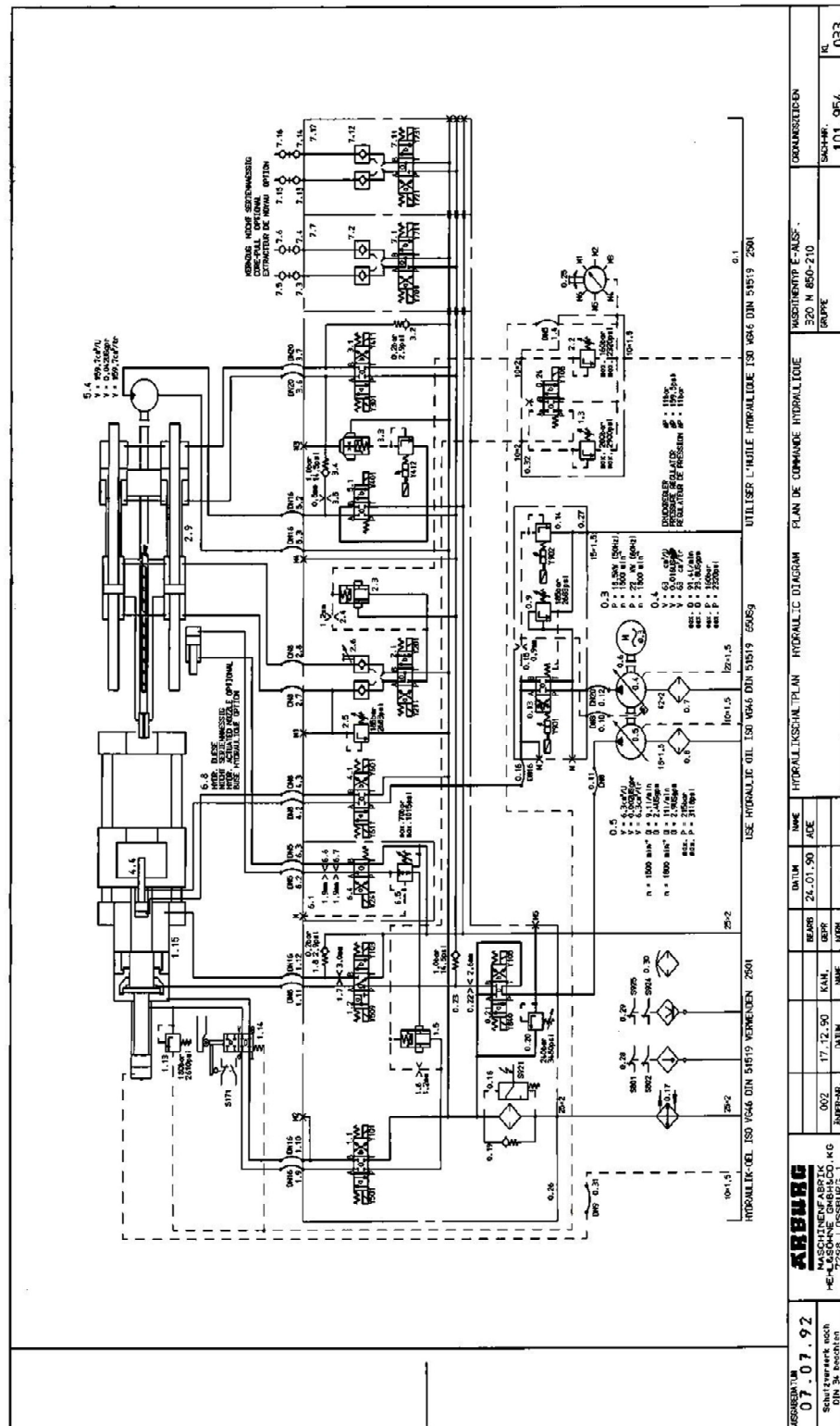


Abbildung 136: Hydraulikplan Spritzgießmaschine<sup>60</sup>

<sup>60</sup> Abb. aus [69]

### 13.3 Zubehör: Messparameter und Messgeräte für die Laboreinrichtung

Messparameter:	Messkomponenten	
Material Input	Waage	
Menge Output	Stücke in QS wiegen	
Volumenstrom in m³/s	1. Honsberg RT020AK008E	Vor- und Rücklauf
Form Kühlwasser Eintrittstemperatur	OMNI-RT-020US	
Form Kühlwasser Austrittstemperatur	2. Temperaturfühler PT100/PT1000	
Druck Kühlwasser Form P <sub>ein</sub>	3. Versuchsapparatur Single	16 Kanäle
Druck Kühlwasser Form P <sub>aus</sub>	4. Versuchsapparatur Regloplas RG50	4 Kanäle
Volumenstrom in m³/s	1. Honsberg RT020AK008E	Vor- und Rücklauf
Öl Kühlwasser Eintrittstemperatur	OMNI-RT-020US	
Öl Kühlwasser Austrittstemperatur	2. Temperaturfühler PT100/PT1000	
Öl Druck Kühlwasser P <sub>ein</sub>	3. Versuchsapparatur Single	16 Kanäle
Öl Druck Kühlwasser P <sub>aus</sub>	4. Versuchsapparatur Regloplas RG50	4 Kanäle
Antriebsstrom in A	ZES LMG 450	
Heizstrom in A		
Klemmspannung in V		
Blind-/Wirkleistungsanteil		
Strahlung	Infrarotkamera	
Strahlung	Software zur Auswertung, ggf. Flächeninhalte zählen	
Strahlung		

Tabelle 55: Labor Versuchseinrichtung, Parameter (2)

## 13.4 Versuchsreihen: Verifizierung Plastifizierarbeit

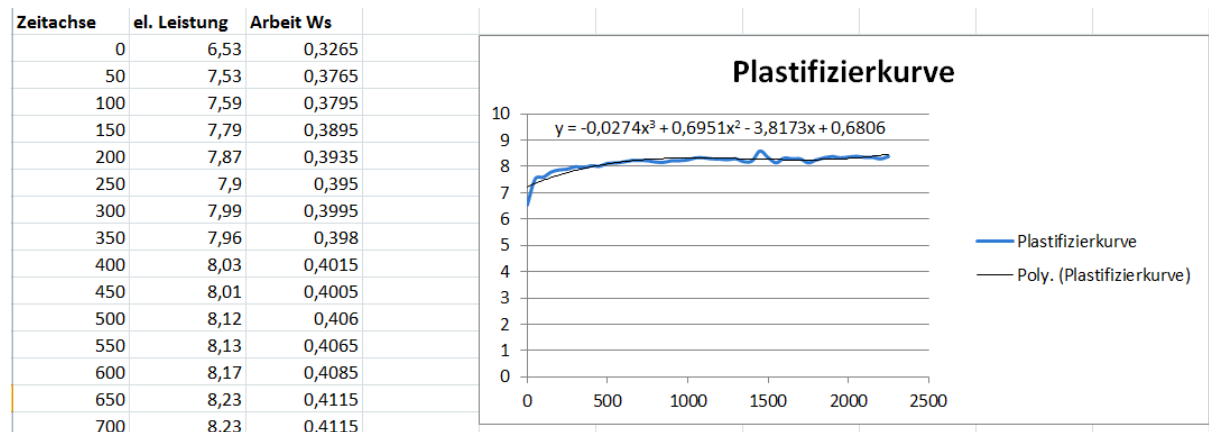


Abbildung 137: Verifizierung Plastifizierarbeit (1)

Die obere Abbildung stellt die Plastifizierarbeitskurve mit Ausgleichsfunktion dar. Die Daten werden auch hier kumuliert. Manuell, mit Scilab Software und mit dem Kumulationsbaustein der SPS.

750	8,22	0,411						
800	8,17	0,4085						
850	8,16	0,408	<b>Berechnung der Einspritzarbeit</b>					
900	8,22	0,411						
950	8,22	0,411	* Einlesen der Werte in Scilab					
1000	8,25	0,4125	*Ausgleichsfunktion ist mit Excel Trendlinie identisch					
1050	8,33	0,4165	*Durchführen der numerischen Integration					
1100	8,33	0,4165	*Ergebnis ist 18,36kWs (Ergebnis ohne Einheit, noch nicht mit Fläche multipl.)					
1150	8,29	0,4145	*Rechnung					
1200	8,28	0,414						
1250	8,26	0,413	<b>Ergebnis aus Scilab</b>		<b>18,36 kWs</b>			
1300	8,29	0,4145			<b>18,36 kJ</b>			
1350	8,18	0,409						
1400	8,21	0,4105						
1450	8,59	0,4295						
1500	8,34	0,417	<b>Einspritzarbeit aus Baustein</b>		<b>18,75 kWs</b>			
1550	8,14	0,407			<b>18,75 kJ</b>			
1600	8,32	0,416						
1650	8,29	0,4145	<b>Abweichung</b>		<b>0,386 kJ</b>			
1700	8,29	0,4145			<b>2% Fehlerabweichung</b>			
1750	8,14	0,407			würden durch Interpolation verloren gehen			
1800	8,25	0,4125						

Abbildung 138: Verifizierung Plastifizierarbeit (2)

### 13.4.1 Versuchsreihen: Verifizierung SCILAB Interpolation

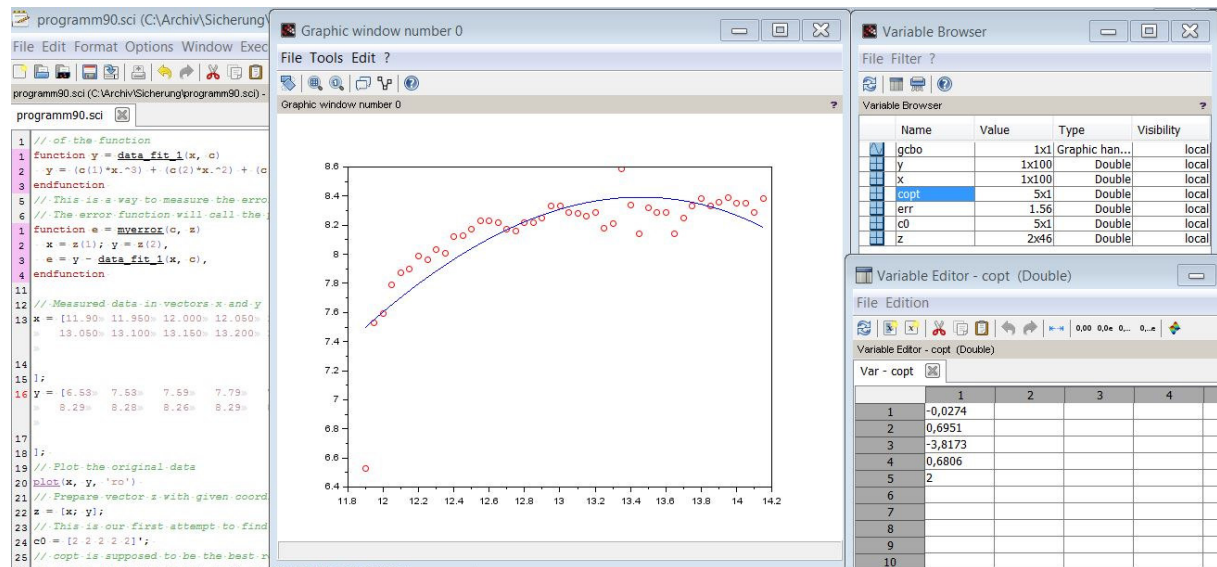


Abbildung 139: Scilab Verifizierung Plastifizierarbeit (1)

### 13.4.2 Versuchsreihen: Verifizierung SCILAB Numerische Integration

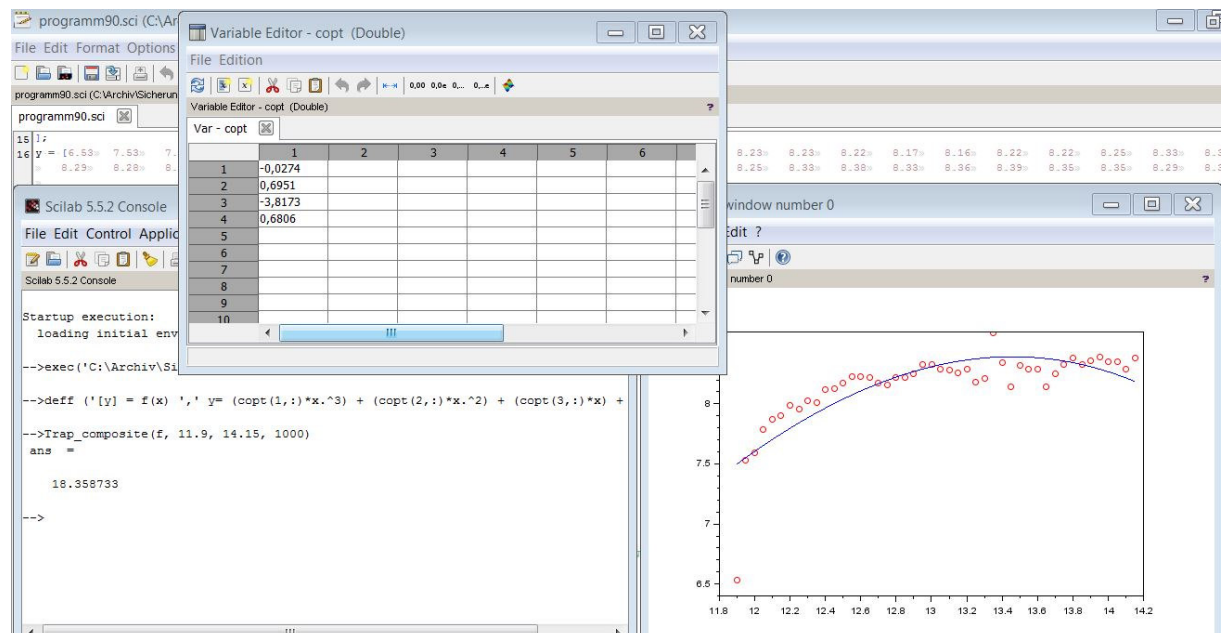


Abbildung 140: Scilab Verifizierung Plastifizierarbeit (2)



## 13.5 Kalibrierung Versuchseinrichtung

### 13.5.1 Kalibrierung der Schneckendrehzahl Dosiermotor

Schneckendrehzahlmessung													
Abgleich und Kalibrierung													
Maschine				Handmessgerät			Impulswandler	Regelpumpe	Impulswandler neu		Impulswandler neu		
Soll	Ist	mit REFERENZ	Ist Testo	errechnetes v	Ist Testo	errechnetes v	Ist Montwill	Turbine	TF 15		TF 20		
	40mm Ø	errechnetes v	REFERENZ	errechnetes v	82mm Ø	errechnetes v							
v [m/min]	v [m/min]	mit Durchm 40mm	n [u/min]	mit Durchm 82mm	v [m/min]	n [u/min]	[l/min]		u/min	v/min	u/min	v/min	
3	2,5	2,48	19,77	5,09	5,15	19,8	./.		23	3,07	23,32	3	
5	4,6	4,56	36,28	9,35	9,37	36,4	./.		40	5,3	40	5,3	
10	9	9,01	71,67	18,46	18,5	72		9,8	77	9,79	81	10,2	
15	13,7	13,52	107,6	27,72	27,77	108,2	17,2		107/122	15,3	114/126	14,3	
20	18	18,13	144,3	37,17	37,29	145	23,5		142/171	17/21	142/163	20	
25	22	22,14	176,2	45,39	45,54	177	28,7		171/214	21/26	190	24	
30	25,5	25,40	202,1	52,06	52,23	203,8	33		214	26	228	28	

Abbildung 141: Kalibrierungstabelle für Dosiermotor zur Aufnahme Plastifizierarbeit

### 13.5.2 Kalibrierungstabelle Turbinen (Abgleich in Reihenschaltung)

V soll [m/min]	EVS [l/min]	Ideal [l/min]	RE1 [l/min]	RE3 [l/min]
3	3,59	3,75	0	2,9
4	4,30	5,00	0	3,6
5	6,21	6,25	0	5,6
6	7,50	7,50	0,2	6,9
7	9,33	8,75	4,7	8,7
8	9,80	10,00	6,3	9,2
9	11,18	11,25	9	10,7
10	12,21	12,50	11,8	11,7
11	13,84	13,75	13,9	13,3
12	14,39	15,00	14,5	13,9
13	16,03	16,25	16,2	15,6
14	17,70	17,50	18	17,3
15	18,26	18,75	18,6	17,9
16	20,00	20,00	20,5	19,7
17		21,25	21,1	20,3
18		22,50	23	22,1
19		23,75	24,3	23,4
20		25,00	25,6	24,6

Tabelle 56: Kalibrierungstabelle Messturbinen für Ölvolumenstrom (1)

V soll [m/min]	EVS [l/min]	Ideal [l/min]	RE1 [l/min]	RE3 [l/min]
21		26,25	26,3	25,3
22		27,50	28,3	27,2
23		28,75	29	27,9
24		30,00	30,5	29,3
25		31,25	31,8	30,6
26		32,50	33,1	31,8
27		33,75	34,6	33,2
28		35,00	35,4	34
29		36,25	37,2	35,6
30		37,50	37,2	35,6
31		38,75	39,1	37,4
32		40,00	40,2	38,4
33		41,25	42,2	40,3
34		42,50	43,1	41,1
35		43,75	44,7	42,5
36		45,00	45,6	43,3
37		46,25	47,1	44,7
38		47,50	47,9	45,4
39		48,75	49,4	46,7
40		50,00	50,8	48
42		52,50	53,4	50,4
44		55,00	56,2	52,9
46		57,50	58,3	54,8
48		60,00	60,2	56,5
50		62,50	60,9	57,1
52		65,00	61,7	57,8
54		67,50	62,3	58,3
56		70,00	62,7	58,7
58		72,50	63,2	59,2
60		75,00	63,4	59,3
62		77,50	63,7	59,5
64		80,00	63,9	59,7
65		81,25	64,1	59,8

Tabelle 57: Kalibrierungstabelle Messturbinen für Ölvolumenstrom (2)

## 13.5.3 Kalibrierung, Luftvolumenstrommessung

Luft Volumenstrommessung			
Rohrquerschnittsfläche Absaugrohr über der Maschine			[m <sup>2</sup> ]
Ventilator	Testo Gerät		0,019
Frequenz [Hz]	Messwerte [m/s]	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]	
0,00		2,3	156,21
20,00		5,8	393,91
22,28		6,2	421,08
23,99		6,8	461,83
25,93		7,2	489,00
28,02		7,6	516,16
30,12		8	543,33
32,98		8,7	590,87
35,12		9,5	645,20
39,94		10,8	733,50
44,97		11,9	808,20
50,00		12,7	862,54
Ergebnis Volumenstrom Eintrittsöffnung [m <sup>3</sup> /s]			<b>0,24</b>

Tabelle 58: Messung Volumenstrom in Versuchsraum

## 13.6 Daten aus Leerlaufmessung aller drei Ölsorten

Leerlaufmessung Shell S4		kW	% Leerlaufmessung Mobil Excel DTE	kW	% Leerlaufmessung Shell Tellus S2	kW	%
Summe Input		5,61	100%	5,62	100%	5,64	100%
Summe Output		5,25	94%	5,20	93%	5,27	93%
Antriebsleistung		5,13	91%	5,14	91%	5,16	91%
Kühlwasser Öl		2,93	52%	2,80	50%	2,68	47%
Luftleistung		1,10	20%	1,16	21%	1,36	24%
Wände Konvektion		1,00	18%	1,00	18%	1,00	18%
Steuerung und Beleuchtung		0,48	9%	0,48	9%	0,48	9%
Kühlwasser Form		0,22	4%	0,24	4%	0,22	4%
Deckung		93,6%	Deckung	92,5%	Deckung	93%	
Antriebsleistung ggü. Tellus S2		Einsparung	-0,7%	Antriebsleistung ggü. Tellus S2	Einsparung	-0,5%	
Leistung Komponente Shell S4		% Leistung Komponente Mobil DTE10		% Leistungen Komponente Shell Tellus 46		% Leistungen Komponente Shell Tellus 46	
Antriebsleistung		100%		100%		100%	
Haltepumpe Mechanisch		26%		26%		27%	
Regelpumpe Wärmeleistung		17%		17%		17%	
Haltepumpe Wärmeleistung		17%		17%		17%	
Regelpumpe Mechanisch		8%		8%		8%	
Konvektion		6%		6%		6%	
Regelpumpe Lecköl		5%		5%		5%	
Haltepumpe Lecköl		1%		1%		2%	

Tabelle 59: Leistungswerte und Prozentanteile im Leerlauf

## 13.7 Sankey Diagramme

### 13.7.1 Sankey Raumbilanz: Laborraum

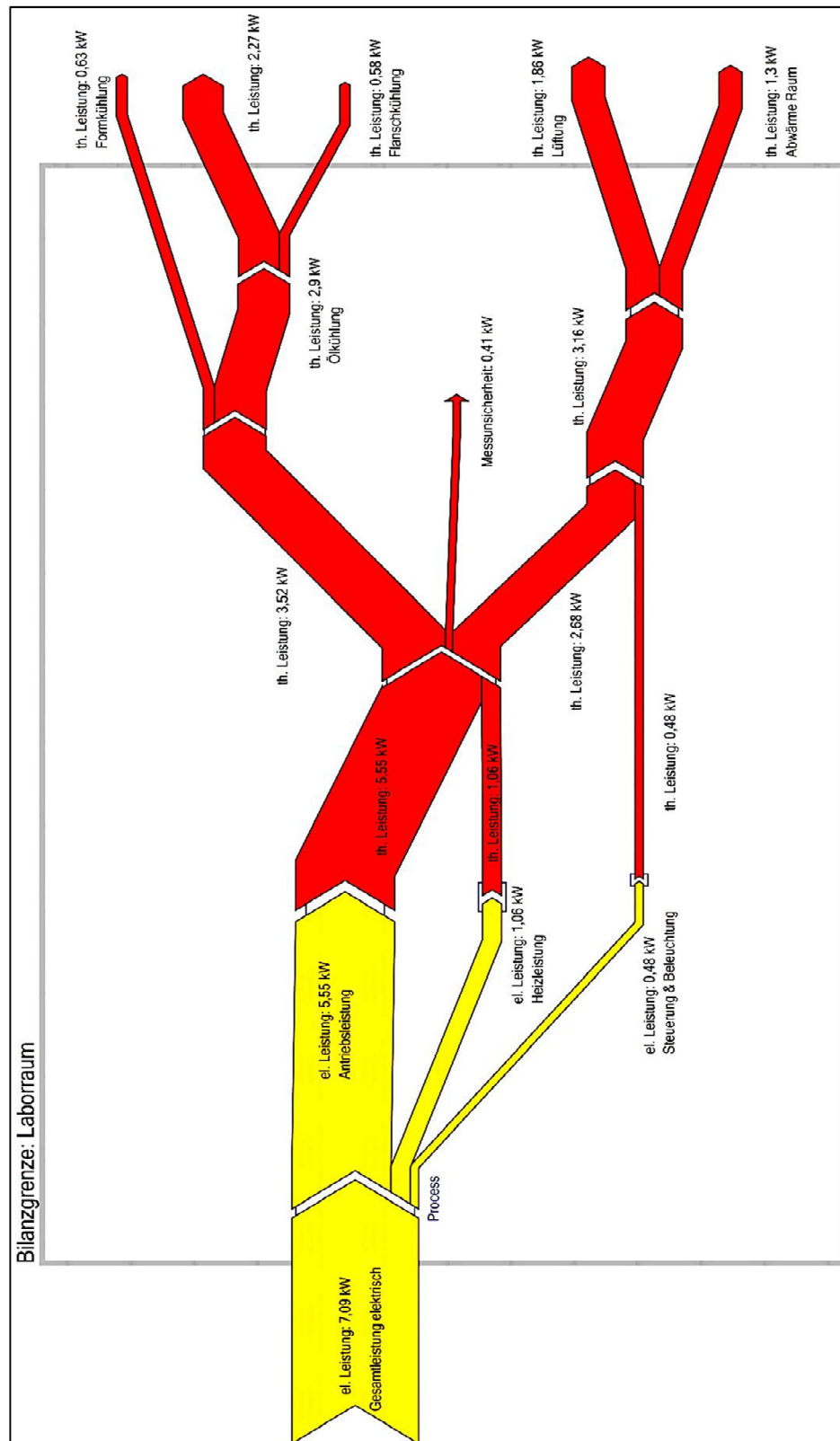


Abbildung 142: Sankey Versuchsraum

## 13.7.2 Sankey Prozessbilanz: Einspritzen

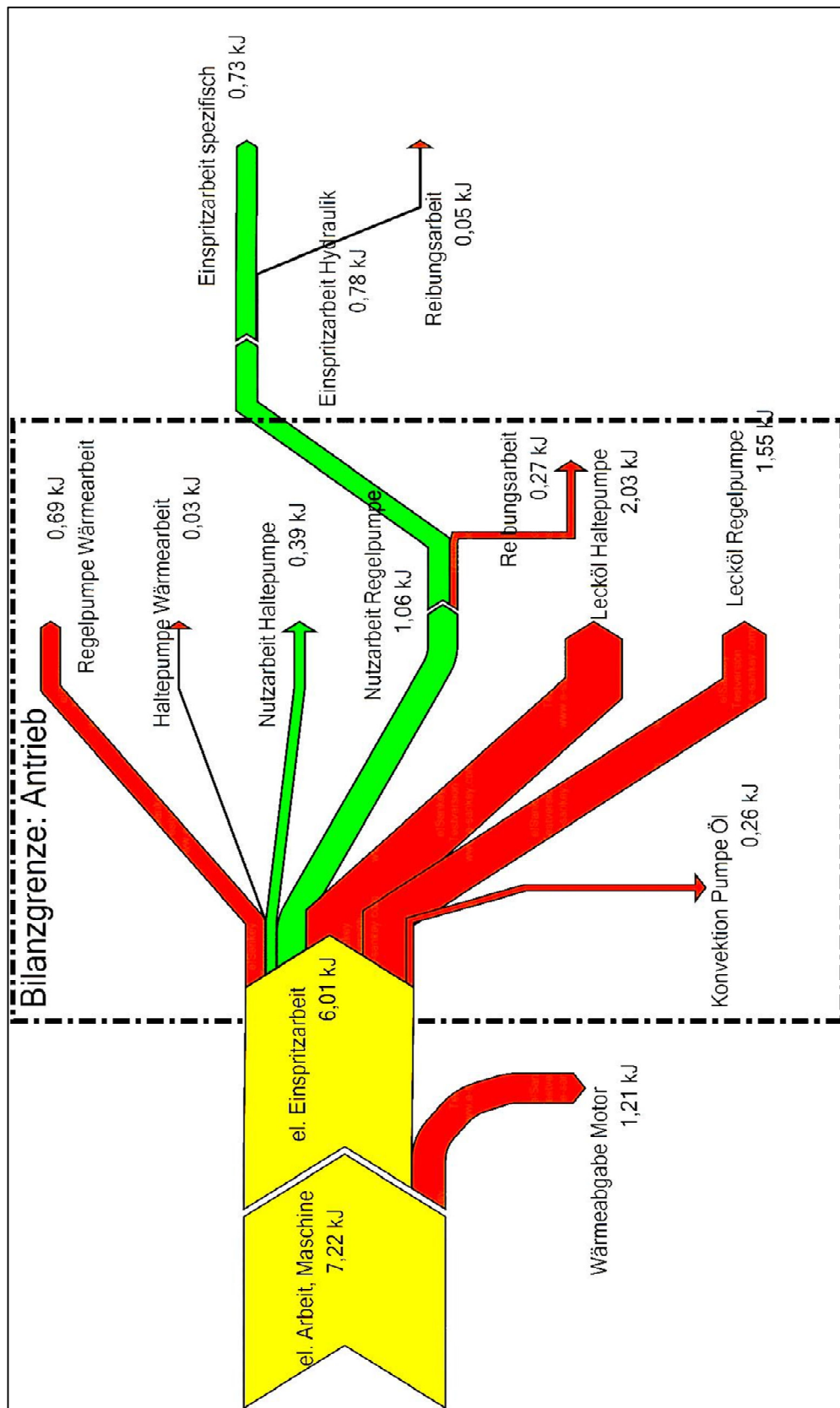


Abbildung 143: Sankey Einspritzarbeit

## 13.7.3 Sankey Prozessbilanz: Plastifizieren

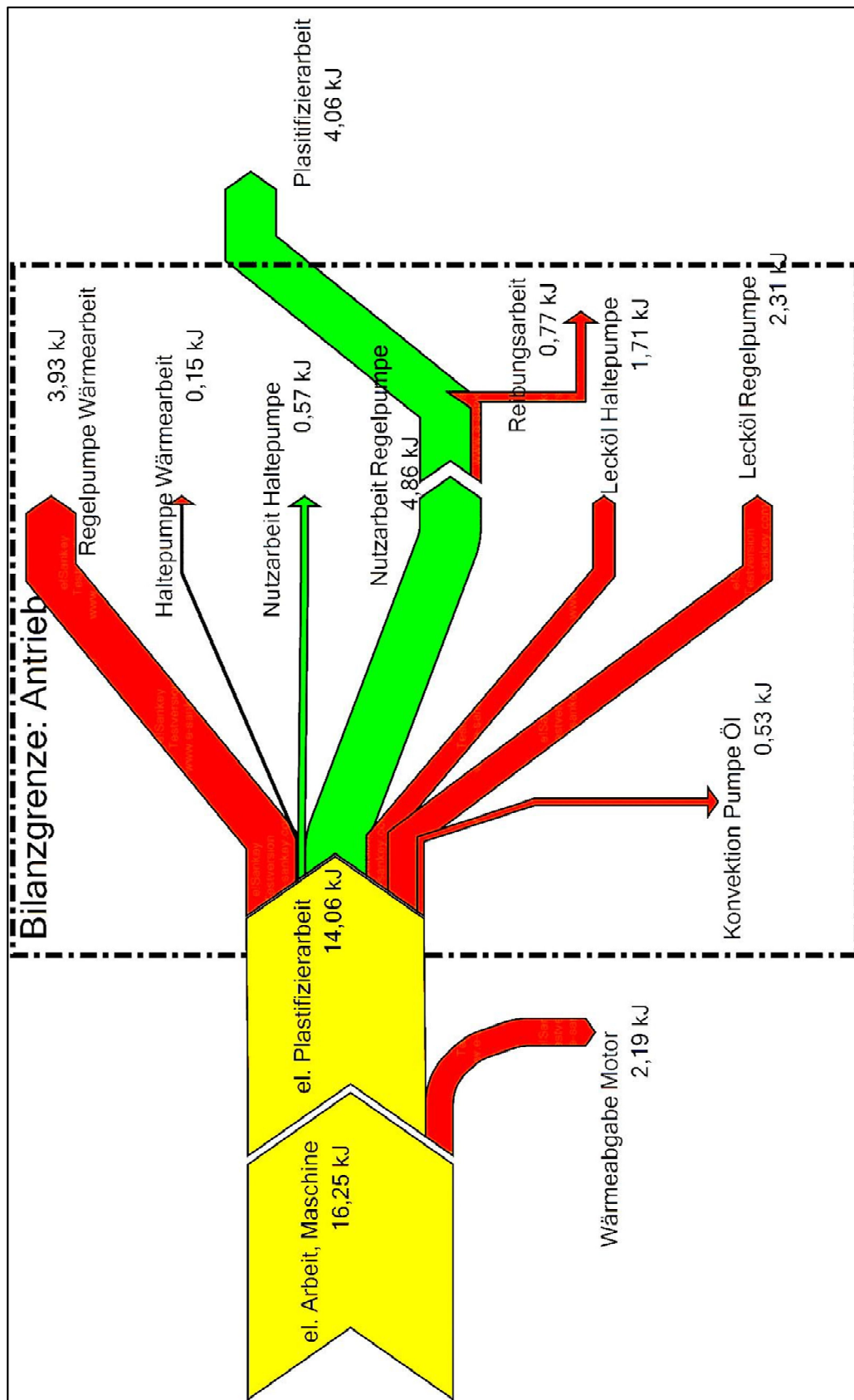


Abbildung 144: Sankey Plastifizierarbeit

## 13.8 Parametertabelle Raumleistungen Diskussion

Bilanz Raummessung	Leistungen											
	Ölkühlung in kW	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
	Formkühlung in kW											
	Flansch Kühlung in kW											
	Lüftung in kW											
	Raumisolierung in kW											
	Heizung in kW											
	Antriebsleistung in kW											
	Steuerung in kW											
	Summe Input in kW											
	Summe Output in kW											
	Deckungsanteil											
Durchfluss Flanschkühl	in l/min											
T <sub>out</sub> Flanschkühl	in °C											
Durchfluss Formkühl	in l/min											
T <sub>out</sub> Formkühl	in °C											
T <sub>in</sub> Formkühl	in °C											
Durchfluss Ölkühl	in l/min											
T <sub>out</sub> Ölkühl	in °C											
T <sub>in</sub> Ölkühl	in °C											
T <sub>si</sub>	in °C											
Raum T <sub>sw</sub>	in °C											
Raum T <sub>in</sub>	in °C											
Grundzustand PPH9020												
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C												
Erhöhung der Öltemperatur 50°C												
Erhöhung der Öltemperatur 55°C												
Isolierung, 215°C Heizung												
Materialtausch PE1800H												
Senkung der Heiztemperatur 190°C												
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C												

Tabelle 60: Parametertabelle Raumbilanz (1)



Bilanz Raummessung	Leistungen											
	Ölkühlung in kW	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,00	5,38	0,48	6,86	6,76	98%
	Formkühlung in kW											
	Flanschkühlung in kW											
	Lüftung in kW											
	Raumisolierung in kW											
	Heizung in kW											
	Antriebsleistung in kW											
	Steuerung in kW											
	Summe Input in kW											
	Summe Output in kW											
	Deckungsanteil											
Raum $T_{in}$ in °C	21,7	28,2										
Raum $T_{sw}$ in °C												
$T_{si}$ in °C												
$T_{in}$ Ölkühl in °C	20,2	26,5										
$T_{out}$ Ölkühl in °C	26,5	20,2	6,7	20,4								
Durchfluss Ölkühl in l/min	6,7	20,4										
$T_{in}$ Formkühl in °C	20,4	20,8										
$T_{out}$ Formkühl in °C	20,8	218										
Durchfluss Formkühl in l/min	218	22,1										
$T_{out}$ Flanschkühl in °C	22,1	4,3										
Durchfluss Flanschkühl in l/min	4,3	22,1										
Erhöhung der Öltemperatur 55°C												
Erhöhung der Öltemperatur 50°C												
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C												
Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel	21,6	28,3	45	20,2	26,5	6,7	20,4	20,8	218	22,1	4,3	98%
Erhöhung der Öltemperatur 50°C												
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C												
Änderung Öl, Shell Tellus S4, PPH9020	21,6	28,3	45	20,2	26,5	6,6	20,4	20,8	218	22,1	4,3	96%
Erhöhung der Öltemperatur 55°C												
Erhöhung der Öltemperatur 50°C												
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C												
Erhöhung der Öltemperatur 55°C												

Tabelle 61: Parametertabelle Raumbilanz (2)

## 13.9 Parametertabelle Einspritzen

		Arbeit										Einspritzarbeit		
		Deckungsanteil	Summe Output in kW	Summe Input in kW	Elektrische Leistung in kW	Konvektion Pumpe in kW	Lecköl Wärme Haltep. in kW	Lecköl Wärme Regelp. in kW	Wärme Haltep. in kW	Wärme Regelp. in kW	Förd. Haltep. in kW	Förd. Regelp. in kW	Deckungsanteil	Spezifisch in kW
Bilanz Einspritzen	Grundzustand, Shell Tellus S2, PPH9020	60	6,02	7,19	7,19	0,26	2,03	1,55	0,03	0,69	0,39	1,06	84%	0,73
	Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	60	5,90	7,08	7,08	0,26	1,95	1,55	0,04	0,68	0,39	1,02	83%	0,71
	Erhöhung der Öltemperatur 50°C	60	6,12	7,21	7,21	0,23	2,03	1,61	0,04	0,71	0,43	1,07	85%	0,73
	Erhöhung der Öltemperatur 55°C	60	6,38	7,41	7,41	0,21	2,03	1,63	0,04	0,73	0,43	1,12	86%	0,75
	Isolierung, 215°C Heizung	60	5,95	7,19	7,19	0,21	2,03	1,55	0,03	0,69	0,39	1,05	83%	0,73
	Materialtausch PE1800H	60	8,95	10,74	10,74	0,29	2,57	2,48	0,04	1,33	0,54	1,71	83%	1,18
	Senkung der Heiztemperatur 180°C	60	9,35	11,26	11,26	0,27	2,57	2,70	0,04	1,42	0,54	1,81	83%	1,23
	Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	60	8,58	10,28	10,28	0,29	2,57	2,48	0,04	1,01	0,54	1,65	83%	1,14
Bilanz Einspritzen	gem. Spritzdruck	bar	60											
	max. pHy Haltep.	in bar	250											
	pHy Haltep	in bar	215											
	max. pHy Regelp.	in bar	70											
	pHy Regelp	in bar	48,5											
	Konv. T <sub>aberrf</sub> Pumpe	in °C	58											
	Durchfluss Haltep. Leck	in l/min	5,1											
	Leck Haltep T <sub>out</sub>	in °C	58,5											
	Durchfluss Regelp. Leck	in l/min	2,1											
	Leck Regelp T <sub>out</sub>	in °C	70											
Bilanz Einspritzen	T <sub>oil</sub>	in °C	45											
	Durchfluss Haltep. Förd	in l/min	1,1											
	Förd. Haltep T <sub>out</sub>	in °C	46											
	Durchfluss Regelp. Förd	in l/min	13,1											
	Förd. Regelp T <sub>out</sub>	in °C	46,3											
			51,2											
			56,3											
			46,3											
			47,9											
			48,1											
Bilanz Einspritzen			47,2											

Tabelle 62: Parametertabelle Einspritzen (1)

Bilanz Einspritzen	Arbeit	Einspritzarbeit		Arbeit												
		Deckungsanteil	Spezifisch in kW/s	Hydraulisch in kW/s	Deckungsanteil	Summe Output in kW/s	Summe Input in kW/s	Elektrische Leistung in kW/s	Konvektion Pumpe in kW/s	Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Haltep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Förd. Haltep. in kW/s	Förd. Regelp. in kW/s	
		68%	0,68	0,70	81%	5,28	6,6	6,6	0,26	1,95	0,95	0,03	0,68	0,39	1,00	
		69%	0,67	0,72	81%	5,11	6,3	6,3	0,26	1,80	0,99	0,03	0,67	0,39	0,96	
		67%	0,68	0,72	81%	5,31	6,6	6,6	0,23	1,95	0,99	0,03	0,71	0,39	1,01	
		69%	0,70	0,72	81%	5,35	6,7	6,7	0,21	1,95	0,99	0,06	0,72	0,39	1,02	
		69%	0,70	0,73	82%	5,57	6,8	6,8	0,26	1,98	1,19	0,04	0,68	0,39	1,02	
		70%	0,68	0,72	82%	5,36	6,5	6,5	0,26	1,84	1,19	0,02	0,68	0,39	0,97	
		68%	0,69	0,75	82%	5,66	6,9	6,9	0,23	1,98	1,24	0,04	0,74	0,43	1,01	
		68%	0,70	0,75	81%	5,66	6,95	6,95	0,19	1,98	1,24	0,03	0,75	0,43	1,04	
		gem. Spritzdruck	bar	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
		max. pHy Haltep.	in bar	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
		pHy Haltep	in bar	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215	215
		max. pHy Regelp.	in bar	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
		pHy Regelp	in bar	44,5	43,5	44	43,5	43,5	43,5	46	58	58	58	58	58	58
Konv. T <sub>elektr.</sub> Pumpe	in °C	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58		
Durchfluss Haltep. Leck	in l/min	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1		
Leck Haltep T <sub>ext</sub>	in °C	58	57	63	68	68	68	59	59	59	59	59	59	59		
Durchfluss Regelp. Leck	in l/min	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5		
Leck Regelp T <sub>ext</sub>	in °C	72	73	78	83	83	83	72	72	72	72	72	72	72		
T <sub>ai</sub>	in °C	45	45	50	55	55	55	45	45	45	45	45	45	45		
Durchfluss Haltep. Förd	in l/min	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1		
Förd. Haltep T <sub>ext</sub>	in °C	46	46	51	57	57	57	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1	46,1		
Durchfluss Regelp. Förd	in l/min	13,5	13,3	13,8	14	14	14	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3	13,3		
Förd. Regelp T <sub>ext</sub>	in °C	46,7	46,7	51,8	56,8	56,8	56,8	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7	46,7		
		Änderung Öl, Shell Tellus S4, PPH9020														
		Änderung Heizung auf 225°C														
		Erhöhung der Öltemperatur 50°C														
		Erhöhung der Öltemperatur 55°C														
		Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel, PPH9020														
		Änderung Heizung auf 225°C														
		Erhöhung der Öltemperatur 50°C														
		Erhöhung der Öltemperatur 55°C														

Tabelle 63: Parametertabelle Einspritzen (2)

## 13.10 Parametertabelle Plastifizieren

Bilanz Plastifizieren	Arbeit	Dosiermotor	Deckungsanteil %	84%
			Plastifizierarbeit in kW/s	4,06
			Deckungsanteil	87%
			Summe Output in kW/s	14,06
			Summe Input in kW/s	16,25
			Elektrische Leistung in kW/s	16,25
			Konvektion Pumpe in kW/s	0,53
			Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	1,71
			Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	2,31
			Wärme Haltep. in kW/s	0,15
			Wärme Regelp. in kW/s	3,93
			Förd. Haltep. in kW/s	0,57
			Förd. Regelp. in kW/s	4,86
gem. Spritzdruck	bar		236	
max. pHy Haltep.	in bar		260	
phy Haltep	in bar		215	
max. pHy Regelp.	in bar		70	
pHy Regelp	in bar		59	
Konv. T <sub>aberrf</sub> Pumpe	in °C		58	
Durchfluss Haltep. Leck	in l/min		2,4	
Leck Haltep T <sub>out</sub>	in °C		57	
Durchfluss Regelp. Leck	in l/min		1,5	
Leck Regelp T <sub>out</sub>	in °C		71	
T <sub>si</sub>	in °C		45	
Durchfluss Haltep. Förd	in l/min		0,8	
Förd. Haltep T <sub>out</sub>	in °C		48	
Durchfluss Regelp. Förd	in l/min		24,7	
Förd. Regelp T <sub>out</sub>	in °C		47,6	
Grundzustand, Shell Tellus S2, FPH9020				
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C				
Erhöhung der Öltemperatur 50°C				
Erhöhung der Öltemperatur 55°C				
Isolierung, 215°C Heizung				
Materialtausch PE1800H				
Senkung der Heiztemperatur 190°C				
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C				

Tabelle 64: Parametertabelle Plastifizieren (1)

Bilanz Plastifizieren	Arbeit	Dosiermotor	Deckungsanteil %	84%	
			Plastifizierarbeit in kW/s	3,94	84%
			Deckungsanteil	82%	82%
			Summe Output in kW/s	12,85	12,71
			Summe Input in kW/s	15,70	15,43
			Elektrische Leistung in kW/s	15,70	15,43
			Konvektion Pumpe in kW/s	0,53	0,53
			Lecköl Wärme Haltep. in kW/s	1,43	1,32
			Lecköl Wärme Regelp. in kW/s	1,67	1,68
			Wärme Haltep. in kW/s	0,19	0,19
			Wärme Regelp. in kW/s	3,68	3,68
			Förd. Haltep. in kW/s	0,65	0,65
Förd. Regelp. in kW/s	4,71	4,67			
gem. Spritzdruck	bar		236		
max. pHy Haltep.	in bar		260		
phy Haltep	in bar		215		
max. pHy Regelp.	in bar	70	215		
pHy Regelp	in bar	56,5	56		
Konv. T <sub>abstr.</sub> Pumpe	in °C	58	58		
Durchfluss Haltep. Leck	in l/min	2,1	2,1		
Leck Haltep T <sub>out</sub>	in °C	57	56		
Durchfluss Regelp. Leck	in l/min	1,05	1,05		
Leck Regelp T <sub>out</sub>	in °C	72	76		
T <sub>oil</sub>	in °C	45	50		
Durchfluss Haltep. Förd	in l/min	0,9	0,95		
Förd. Haltep T <sub>out</sub>	in °C	48,5	54		
Durchfluss Regelp. Förd	in l/min	25	25,6		
Förd. Regelp T <sub>out</sub>	in °C	47,5	57,6		
Änderung Öl, Shell Tellus S4, PPH9020					
Änderung Heizung auf 225°C					
Erhöhung der Öltemperatur 50°C					
Erhöhung der Öltemperatur 55°C					
Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel, PPH9020					
Änderung der Heizung auf 225°C					
Erhöhung der Öltemperatur 50°C					
Erhöhung der Öltemperatur 55°C					

Tabelle 65: Parametertabelle Plastifizieren (2)

## 13.11 Diskussion: Abweichungsanalyse, Übersichtstabelle Raumbilanz

Abweichungsanalyse Raumbilanz	Leistungen										
	Ülkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Lüftungs- leistung in kW	Raum- isolierung in kW	Heizleistung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	2,94	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,55	0,48	7,03	6,69	95%
SPS	2,90	0,63	0,58	1,86	1,30	1,06	5,55	0,48	7,08	6,68	94%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-4%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	2,77	0,61	0,60	1,94	1,30	1,20	5,50	0,48	7,18	6,61	92%
SPS	2,77	0,68	0,61	1,91	1,30	1,19	5,50	0,48	7,17	6,66	93%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-11%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,89	0,61	0,54	1,85	1,30	1,00	5,58	0,48	7,06	6,65	94%
SPS	2,87	0,63	0,59	1,88	1,30	1,06	5,57	0,48	7,11	6,67	94%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-9%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,80	0,60	0,54	1,85	1,30	1,00	5,60	0,48	7,08	6,55	93%
SPS	2,84	0,63	0,59	1,89	1,30	1,05	5,61	0,48	7,14	6,65	93%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,04</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,10</b>	<b>-0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-1%</b>	<b>-4%</b>	<b>-10%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>-5%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-2%</b>	

Tabelle 66: Abweichungsanalyse Raumbilanz (1)

Abweichungsanalyse Raumbilanz	Leistungen										
	Ülkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Lüftungs- leistung in kW	Raum- isolierung in kW	Heizleistung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Materialtausch PE1800H	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,06	5,60	0,48	7,14	6,76	95%
SPS	2,86	0,62	0,52	1,86	1,30	1,06	5,60	0,48	7,11	6,63	93%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,08</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>0,12</b>	<b>0,01</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>3%</b>	<b>-1%</b>	<b>9%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	
Senkung der Heiztemperatur 190°C	2,85	0,61	0,51	1,62	1,30	0,82	5,63	0,48	6,93	6,38	92%
SPS	2,72	0,60	0,50	1,84	1,30	0,79	5,63	0,48	6,80	6,45	95%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,14</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,21</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,13</b>	<b>-0,07</b>	<b>-0,03</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>5%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>-13%</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	2,68	0,61	0,57	1,94	1,30	1,16	5,53	0,48	7,17	6,52	91%
SPS	2,66	0,62	0,54	1,96	1,30	1,17	5,53	0,48	7,19	6,54	91%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>5%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 67: Abweichungsanalyse Raumbilanz (2)

Abweichungsanalyse Raumbilanz	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Luftungs- leistung in kW	Raum- isolierung in kW	Heizleistung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Änderung Öl, Shell Tellus S4	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,00	5,38	0,48	6,86	6,76	98%
SPS	2,87	0,63	0,58	1,86	1,30	1,06	5,38	0,48	6,92	6,66	96%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,07</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>2%</b>	<b>-3%</b>	<b>-1%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	2,90	0,61	0,57	1,91	1,30	1,15	5,35	0,48	6,98	6,71	96%
SPS	2,72	0,62	0,58	1,88	1,30	1,22	5,30	0,48	6,99	6,53	93%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,18</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,07</b>	<b>0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,18</b>	<b>0,03</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>6%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,85	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,39	0,48	6,87	6,61	96%
SPS	2,84	0,63	0,58	1,88	1,30	1,05	5,39	0,48	6,93	6,64	96%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-5%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,81	0,46	0,57	1,88	1,30	1,00	5,40	0,48	6,88	6,44	94%
SPS	2,81	0,48	0,59	1,88	1,30	1,05	5,40	0,48	6,94	6,62	95%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,17</b>	<b>-0,02</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-5%</b>	<b>-3%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-5%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	

Tabelle 68: Abweichungsanalyse Raumbilanz (3)

Abweichungsanalyse Raumbilanz	Leistungen										
	Ölkühlung in kW	Formkühlung in kW	Flansch- kühlung in kW	Luftungs- leistung in kW	Raum- isolierung in kW	Heizleistung in kW	Antriebsleistung in kW	Steuerung in kW	Summe Input in kW	Summe Output in kW	Deckungsanteil
Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel	2,94	0,61	0,57	1,91	1,30	1,00	5,40	0,48	6,88	6,76	98%
SPS	2,87	0,63	0,58	1,86	1,30	1,06	5,40	0,48	6,94	6,66	96%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,07</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,10</b>	<b>0,02</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>2%</b>	<b>-3%</b>	<b>-1%</b>	<b>3%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	2,90	0,61	0,57	1,91	1,30	1,13	5,37	0,48	6,98	6,71	96%
SPS	2,73	0,62	0,56	1,93	1,30	1,21	5,35	0,48	7,04	6,58	93%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,16</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,08</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,13</b>	<b>0,03</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>6%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-7%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>2%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	2,81	0,61	0,57	1,85	1,30	1,00	5,41	0,48	6,89	6,57	95%
SPS	2,84	0,63	0,58	1,88	1,30	1,06	5,41	0,48	6,95	6,64	96%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,08</b>	<b>0,00</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-1%</b>	<b>-3%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	2,77	0,46	0,57	1,85	1,30	1,00	5,42	0,48	6,90	6,37	92%
SPS	2,81	0,48	0,59	1,88	1,30	1,06	5,42	0,48	6,96	6,62	95%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,25</b>	<b>-0,03</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-2%</b>	<b>-5%</b>	<b>-3%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-4%</b>	

Tabelle 69: Abweichungsanalyse Raumbilanz(4)

## 13.12 Diskussion: Abweichungsanalyse, Übersichtstabelle Einspritzen

Abweichungsanalyse Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Ford Regelp. in kW/s	Ford Hallep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Hallep. in kW/s	Lecköl Regelp. in kW/s	Lecköl Hallep. in kW/s	Korrektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Hydraulisch in kW/s	Spezifisch in kW/s	Deckungsanteil
Grundzustand PPH9020	1,06	0,39	0,69	0,03	1,55	2,03	0,26	7,19	7,19	6,02	84%	0,78	0,73	69%
SPS	1,05	0,39	0,69	0,04	1,55	2,07	0,25	7,22	7,22	6,03	84%	0,78	0,73	69%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>-11%</b>	<b>0%</b>	<b>-2%</b>	<b>5%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	1,02	0,39	0,68	0,04	1,55	1,95	0,26	7,08	7,08	5,90	83%	0,76	0,71	70%
SPS	1,01	0,40	0,68	0,04	1,55	1,95	0,26	7,08	7,08	5,88	83%	0,76	0,71	70%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>14%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,07	0,43	0,71	0,04	1,61	2,03	0,23	7,21	7,21	6,12	85%	0,79	0,73	68%
SPS	1,07	0,42	0,70	0,04	1,61	2,04	0,23	7,21	7,21	6,11	85%	0,78	0,73	68%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,003</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0%</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>7%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,12	0,43	0,73	0,04	1,83	2,03	0,21	7,41	7,41	6,38	86%	0,82	0,75	67%
SPS	1,11	0,44	0,72	0,04	1,74	2,05	0,21	7,41	7,41	6,31	85%	0,81	0,75	67%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,005</b>	<b>0,09</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>-15%</b>	<b>5%</b>	<b>-1%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 70: Abweichungsanalyse Einspritzen (1)

Abweichungsanalyse Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Ford Regelp. in kW/s	Ford Hallep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Hallep. in kW/s	Lecköl Regelp. in kW/s	Lecköl Hallep. in kW/s	Korrektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Hydraulisch in kW/s	Spezifisch in kW/s	Deckungsanteil
Materialtausch PE1800H	1,71	0,54	1,33	0,04	2,48	2,57	0,29	10,74	10,74	8,95	83%	1,38	1,18	69%
SPS	1,70	0,54	1,37	0,05	2,49	2,57	0,29	10,74	10,74	9,01	84%	1,38	1,18	70%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,04</b>	<b>-0,002</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,06</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-3%</b>	<b>-5%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Senkung der Heiztemperatur 190°C	1,81	0,54	1,42	0,04	2,70	2,57	0,27	11,26	11,26	9,35	83%	1,47	1,23	68%
SPS	1,81	0,54	1,40	0,05	2,70	2,57	0,27	11,26	11,26	9,34	83%	1,47	1,23	68%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,005</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>-11%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	1,65	0,54	1,01	0,04	2,48	2,57	0,29	10,28	10,28	8,58	83%	1,33	1,14	69%
SPS	1,64	0,53	1,00	0,05	2,45	2,58	0,28	10,28	10,28	8,53	83%	1,33	1,14	70%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,002</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>-4%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 71: Abweichungsanalyse Einspritzen (2)



Abweichungsanalyse Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Ford Regelp. in kWs	Ford Hallep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Hallep. in kWs	Lecköl Regelp. in kWs	Lecköl Hallep. in kWs	Korrektion in kWs	Elektr. Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Hydraulisch in kWs	Spezifisch in kWs	Deckungsanteil
<b>Änderung Öl, Shell Tellus S4</b>	1,00	0,39	0,68	0,03	0,95	1,95	0,26	6,55	6,55	5,28	81%	0,70	0,68	68%
SPS	1,01	0,36	0,69	0,04	0,98	1,97	0,26	6,6	6,6	5,31	81%	0,69	0,68	67%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,006</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-1%</b>	<b>9%</b>	<b>-1%</b>	<b>-20%</b>	<b>-3%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	0,96	0,39	0,67	0,03	0,99	1,80	0,26	6,30	6,30	5,11	81%	0,72	0,67	69%
SPS	0,96	0,42	0,67	0,03	0,98	1,80	0,26	6,30	6,30	5,12	81%	0,71	0,67	70%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,001</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>-1%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,01	0,39	0,71	0,03	0,99	1,95	0,23	6,60	6,60	5,31	81%	0,72	0,68	67%
SPS	1,00	0,37	0,71	0,04	0,99	1,96	0,23	6,58	6,58	5,31	81%	0,72	0,68	68%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,012</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>6%</b>	<b>0%</b>	<b>-38%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,02	0,39	0,72	0,06	0,99	2,10	0,21	6,70	6,70	5,50	82%	0,72	0,70	69%
SPS	1,02	0,38	0,73	0,06	0,99	2,05	0,21	6,68	6,68	5,44	81%	0,72	0,70	69%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,005</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>	<b>-1%</b>	<b>8%</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	

Tabelle 72: Abweichungsanalyse Einspritzen (3)

Abweichungsanalyse Einspritzen	Arbeit											Einspritzarbeit		
	Ford Regelp. in kWs	Ford Hallep. in kWs	Wärme Regelp. in kWs	Wärme Hallep. in kWs	Lecköl Regelp. in kWs	Lecköl Hallep. in kWs	Korrektion in kWs	Elektr. Leistung in kWs	Summe Input in kWs	Summe Output in kWs	Deckungsanteil	Hydraulisch in kWs	Spezifisch in kWs	Deckungsanteil
<b>Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel</b>	1,02	0,39	0,68	0,04	1,19	1,98	0,26	6,80	6,80	5,57	82%	0,73	0,70	69%
SPS	1,02	0,38	0,68	0,04	1,18	1,96	0,26	6,8	6,8	5,52	81%	0,73	0,70	69%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,05</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>	<b>0%</b>	<b>-10%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	0,97	0,39	0,68	0,019	1,19	1,84	0,26	6,50	6,50	5,36	82%	0,72	0,68	70%
SPS	0,97	0,39	0,69	0,020	1,18	1,82	0,27	6,53	6,53	5,33	82%	0,73	0,67	69%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,001</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,03</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>-2%</b>	<b>-4%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	1,01	0,43	0,74	0,04	1,24	1,98	0,23	6,90	6,90	5,66	82%	0,75	0,69	68%
SPS	1,03	0,42	0,74	0,04	1,23	1,97	0,23	6,90	6,90	5,66	82%	0,75	0,69	67%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,004</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-2%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>-12%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	1,04	0,43	0,75	0,03	1,24	1,98	0,19	6,95	6,95	5,66	81%	0,75	0,70	68%
SPS	1,04	0,44	0,75	0,04	1,23	1,97	0,19	7,00	7,00	5,66	81%	0,75	0,70	67%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,009</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,05</b>	<b>-0,05</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-2%</b>	<b>1%</b>	<b>-27%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 73: Abweichungsanalyse Einspritzen (4)

### 13.13 Diskussion: Abweichungsanalyse, Übersichtstabelle Plastifizieren

Abweichungsanalyse Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Ford Regelp. in kW/s	Ford Hallep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Hallep. in kW/s	Lecköl Regelp. in kW/s	Lecköl Hallep. in kW/s	Konvektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s	Deckungsanteil %
Grundzustand PPH9020	4,86	0,57	3,93	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	14,06	87%	4,06	84%
SPS	4,83	0,52	3,94	0,15	2,31	1,71	0,53	16,25	16,25	13,99	86%	4,06	84%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,03</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>9%</b>	<b>0%</b>	<b>-3%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	4,78	0,57	3,78	0,15	2,22	1,57	0,53	15,76	15,76	13,60	86%	3,94	83%
SPS	4,73	0,55	3,78	0,15	2,25	1,58	0,53	15,76	15,76	13,57	86%	3,94	83%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,04</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>4%</b>	<b>0%</b>	<b>-4%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	5,02	0,57	4,21	0,14	2,44	1,75	0,45	16,73	16,73	14,58	87%	4,14	83%
SPS	5,02	0,57	4,20	0,15	2,42	1,76	0,45	16,73	16,73	14,57	87%	4,14	83%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>-9%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	5,11	0,57	4,44	0,14	2,53	1,59	0,41	17,21	17,21	14,81	86%	4,26	83%
SPS	5,16	0,57	4,44	0,18	2,52	1,61	0,41	17,21	17,21	14,89	87%	4,26	83%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,09</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>-27%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 74: Abweichungsanalyse Plastifizieren (1)

Abweichungsanalyse Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Ford Regelp. in kW/s	Ford Hallep. in kW/s	Wärme Regelp. in kW/s	Wärme Hallep. in kW/s	Lecköl Regelp. in kW/s	Lecköl Hallep. in kW/s	Konvektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s	Deckungsanteil %
Materialtausch PE1800H	6,75	0,65	4,78	0,17	2,77	1,85	0,61	20,13	20,13	17,58	87%	5,55	82%
SPS	6,73	0,61	4,78	0,18	2,72	1,88	0,61	20,13	20,13	17,50	87%	5,55	82%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,03</b>	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,07</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>6%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Senkung der Heiztemperatur 190°C	7,12	0,65	4,78	0,17	2,77	1,85	0,61	20,50	20,50	17,94	88%	5,84	82%
SPS	7,11	0,62	4,78	0,18	2,72	1,88	0,61	20,50	20,50	17,90	87%	5,84	82%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,04</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>5%</b>	<b>0%</b>	<b>-7%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	6,62	0,65	4,76	0,17	2,66	1,85	0,61	20,13	20,13	17,32	86%	5,55	84%
SPS	6,73	0,61	4,78	0,18	2,61	1,88	0,61	20,13	20,13	17,51	87%	5,55	82%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,04</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,05</b>	<b>-0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,18</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>-2%</b>	<b>6%</b>	<b>0%</b>	<b>-6%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	

Tabelle 75: Abweichungsanalyse Plastifizieren (2)

Abweichungsanalyse Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Ford Pegelp. in kW/s	Ford Hallep. in kW/s	Wärme Pegelp. in kW/s	Wärme Hallep. in kW/s	Lecköl Pegelp. in kW/s	Lecköl Hallep. in kW/s	Konvektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s	Deckungsanteil %
<b>Änderung Öl, Shell Tellus S4</b>	4,71	0,65	3,68	0,19	1,67	1,43	0,53	15,70	15,70	12,85	82%	3,94	84%
SPS	4,69	0,64	3,66	0,19	1,67	1,44	0,53	15,71	15,71	12,82	82%	3,94	84%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	4,67	0,65	3,68	0,19	1,68	1,32	0,53	15,43	15,43	12,71	82%	3,92	84%
SPS	4,66	0,65	3,65	0,19	1,68	1,30	0,52	15,43	15,43	12,66	82%	3,92	84%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>2%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	4,78	0,68	3,77	0,22	1,61	1,49	0,45	15,75	15,75	13,00	83%	3,94	82%
SPS	4,80	0,68	3,76	0,20	1,60	1,48	0,45	15,75	15,75	12,97	82%	3,94	82%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>11%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	4,85	0,70	3,98	0,19	1,61	1,49	0,41	15,77	15,77	13,24	84%	3,98	82%
SPS	4,87	0,71	3,98	0,21	1,60	1,47	0,41	15,77	15,77	13,26	84%	3,95	81%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>-0,02</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>0,03</b>	<b>1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>-10%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	

Tabelle 76: Abweichungsanalyse Plastifizieren (3)

Abweichungsanalyse Plastifizieren	Arbeit										Dosiermotor		
	Ford Pegelp. in kW/s	Ford Hallep. in kW/s	Wärme Pegelp. in kW/s	Wärme Hallep. in kW/s	Lecköl Pegelp. in kW/s	Lecköl Hallep. in kW/s	Konvektion in kW/s	Elektr. Leistung in kW/s	Summe Input in kW/s	Summe Output in kW/s	Deckungsanteil	Plastifizierarbeit in kW/s	Deckungsanteil %
<b>Änderung Öl, Mobil DTE10 Excel</b>	4,77	0,64	3,85	0,16	1,92	1,37	0,53	15,80	15,80	13,24	84%	3,96	83%
SPS	4,73	0,63	3,82	0,17	1,92	1,37	0,53	15,80	15,80	13,16	83%	3,96	84%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,04</b>	<b>0,01</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,08</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>-1%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>-5%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Heiztemperatur 225°C	4,69	0,68	3,55	0,17	1,92	1,37	0,53	15,70	15,70	12,91	82%	3,93	84%
SPS	4,67	0,68	3,55	0,16	1,91	1,35	0,52	15,82	15,82	12,84	81%	3,93	84%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,12</b>	<b>-0,12</b>	<b>0,07</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>8%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 50°C	4,85	0,68	3,91	0,20	1,99	1,36	0,45	15,92	15,92	13,43	84%	4,10	85%
SPS	4,81	0,69	3,91	0,19	1,97	1,35	0,45	15,92	15,92	13,37	84%	3,95	82%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,03</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,06</b>	<b>0,00</b>	<b>0,15</b>	<b>2%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>1%</b>	<b>-2%</b>	<b>0%</b>	<b>2%</b>	<b>1%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>4%</b>	
Erhöhung der Öltemperatur 55°C	4,94	0,68	3,98	0,18	1,83	1,41	0,41	15,95	15,95	13,45	84%	4,10	83%
SPS	4,93	0,69	3,98	0,18	1,83	1,41	0,41	16,03	16,03	13,43	84%	3,97	81%
<b>Abweichung in kW</b>	<b>0,01</b>	<b>-0,01</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-0,08</b>	<b>-0,08</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,13</b>	<b>2%</b>
<b>Abweichung in %</b>	<b>0%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>0%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>-1%</b>	<b>-1%</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>3%</b>	

Tabelle 77: Abweichungsanalyse Plastifizieren (4)

### 13.14 Maschinenfähigkeitsuntersuchung

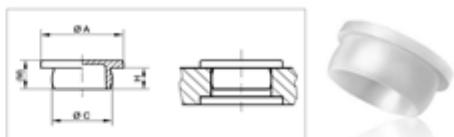
Prozess Kappen F24										
Versuch 1										
	Bemaßung	Toleranz		Eingriff bei 2,85 u. 2,95						
		x <sub>min</sub>	x <sub>max</sub>							
		A	3,48							3,66
		C	2,83							2,97
		H	1,1							1,3
M	1,4	1,6								
										
Messung	A	C	H	(M)		Varianz A	Varianz C	Varianz H	Varianz (M)	
1	3,6	2,9	1,2		1,5	0,00076	0,00000	0,00001	0,00001	
2	3,56	2,9	1,2		1,5	0,00016	0,00000	0,00001	0,00001	
3	3,54	2,89	1,2		1,5	0,00106	0,00009	0,00001	0,00001	
4	3,57	2,9	1,2		1,5	0,00001	0,00000	0,00001	0,00001	
5	3,57	2,93	1,2		1,5	0,00001	0,00093	0,00001	0,00001	
6	3,58	2,87	1,2		1,5	0,00006	0,00087	0,00001	0,00001	
7	3,57	2,9	1,2		1,55	0,00001	0,00000	0,00001	0,00276	
8	3,58	2,9	1,2		1,5	0,00006	0,00000	0,00001	0,00001	
9	3,57	2,93	1,2		1,5	0,00001	0,00093	0,00001	0,00001	
10	3,57	2,89	1,15		1,5	0,00001	0,00009	0,00226	0,00001	
11	3,6	2,9	1,2		1,5	0,00076	0,00000	0,00001	0,00001	
12	3,56	2,9	1,25		1,45	0,00016	0,00000	0,00276	0,00226	
13	3,57	2,9	1,2		1,5	0,00001	0,00000	0,00001	0,00001	
14	3,57	2,89	1,2		1,5	0,00001	0,00009	0,00001	0,00001	
15	3,56	2,9	1,2		1,5	0,00016	0,00000	0,00001	0,00001	
16	3,6	2,89	1,15		1,5	0,00076	0,00009	0,00226	0,00001	
17	3,57	2,9	1,2		1,45	0,00001	0,00000	0,00001	0,00226	
18	3,57	2,89	1,2		1,5	0,00001	0,00009	0,00001	0,00001	
19	3,57	2,9	1,2		1,5	0,00001	0,00000	0,00001	0,00001	
20	3,57	2,91	1,2		1,5	0,00001	0,00011	0,00001	0,00001	

Tabelle 78: Produktmessungen, Varianzberechnung und Toleranzen

Häufigkeitstabelle			
Außenmaß A in cm	Häufigkeit	Stück	
3,52	0		
3,54	1		
3,56	3		
3,57	11		
3,58	2		
3,6	3		
3,62	0		
Innenmaß C in cm	Häufigkeit	Stück	
2,85	0		
2,87	1		
2,89	5		
2,9	11		
2,91	1		
2,93	2		
2,95	0		
Höhe H in cm	Häufigkeit	Stück	
1,05	0		
1,1	0		
1,15	2		
1,2	17		
1,25	1		
1,3	0		
1,35	0		
Höhe (M) in cm	Häufigkeit	Stück	
1,35	0		
1,4	0		
1,45	2		
1,5	17		
1,55	1		
1,6	0		
1,65	0		

Tabelle 79: Häufigkeitstabelle vorkommender Abmessungen

<b>Abmessungen A</b>				
			0,00021	varianz
Mittelwert Abm. A	<b>3,5725</b>		0,01446411	standardabweichung
			<b>2,07410</b>	<b>cmk</b>
<b>Abmessungen C</b>				
			0,00017	varianz
Mittelwert Abm. C	<b>2,8995</b>		0,01316894	standardabweichung
			<b>1,77185</b>	<b>cmk</b>
<b>Abmessungen H</b>				
			0,00039	varianz
Mittelwert Abm. H	<b>1,1975</b>		0,01970172	standardabweichung
			<b>1,69190</b>	<b>cmk</b>
<b>Abmessungen (M)</b>				
			0,00039	varianz
Mittelwert Abm. (M)	<b>1,4975</b>		0,01970172	standardabweichung
			<b>1,69190</b>	<b>cmk</b>

Tabelle 80: Maschinenfähigkeitswerte

## 13.15 Zeitaufnahmen

### 13.15.1 Zeitaufnahme, manueller Messprozess

Zeitaufnahme Analyseprozess Maschinenparameter manuell																												
Nr.	Ablaufabschnitt und Messpunkt	Menge	24	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ L/n	L	t <sub>h</sub> L/1000h		
1	SPS-Temperaturübersicht öffnen Übersicht laden	1	mz																									
			L	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	0,10	
			ti	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10		
2	Temperaturren, Volumenströme ablesen und notieren Ablage Schreiber	1	F	10	225,2	431,3	638,6	845	1060	1277	1485,9	1691,4	1902,7	2100,5	2317,7	2530,8	2743,1	2955,5	3169,9	3388	3599,4	3807,9	4022,2					
			L	100	100	110	110	100	100	100	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	1035	1035	63,34
			ti	62	60	60	61	62	63	63	61	60	60	61	61	66	62	66	64	64	64	62	62	62	612	612		
3	Temperaturren und Volumenströme in Excel-File eingeben letzte Bestätigung mit ENTER	1	F	72	285,2	491,3	693,6	907	1123	1340	1546,9	1751,4	1962,7	2171,5	2378,7	2586,8	2800	3021,5	3233,9	3452	3681,4	3893,9	4094,2					
			L	100	100	110	110	100	100	100	95	95	95	95	100	100	100	100	100	100	100	100	95	95	95	1025	1025	25,11
			ti	25	24	25	25	24	24	25	24	24	25	25	25	24	24	25	25	25	25	25	25	25	245	245		
4	Zykuszeit ablesen und notieren Ablage Schreiber oder Direkteneingabe in Excel	1	F	97	303,2	516,3	724,6	931	1147	1365	1570,3	1775,4	1987,7	2196,5	2403,7	2620,8	2834,1	3046,5	3258,9	3477	3688,4	3894,9	4103,2					
			L	100	105	105	105	100	100	100	100	100	105	100	105	105	105	100	100	100	100	100	100	105	1030	1030	10,87	
			ti	10,2	11,1	10,3	10,4	10,4	11,1	10,4	10,5	10,3	10,8	10,2	11,1	10,3	10,4	10,4	11,1	10,4	10,5	10,3	10,3	10,8	105,5	105,5		
5	Zykuszeit eingeben in Excel letzte Bestätigung mit ENTER	1	F	107,2	320,3	525,6	735	941,4	1159	1375	1591,4	1785,7	1938,5	2206,7	2444,8	2631,1	2844,5	3056,9	3270	3487,4	3636,9	3805,2	4120					
			L	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	105	1010	1010	11,82	
			ti	13	12	12	11	13	12	12	11	11	11	11	11	11	12	12	11	11	12	12	11	11	118	118		
6	errechnete Werte kontrollieren bestätigung mit ENTER optional wenn Handlung erforderlich	1	F	120,2	332,3	533,6	746	954,4	1171	1387	1592,4	1796,7	2009,5	2217,7	2426,8	2643,1	2855,5	3067,9	3282	3499,4	3707,9	3916,2	4131					
			L	105	100	105	110	100	105	100	105	100	100	105	100	105	110	100	105	100	105	100	100	100	1030	1030	19,16	
			ti	18	18	13	18	18	18	18	18	18	19	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	186	186		
7	Hinsehen zur Maschine, Produkte kontrollieren Ablage letztes Produkt in Kasten	1	F	132,2	350,3	557,6	764	974,4	1190	1405	1610,4	1815,7	2028,5	2236,7	2444,8	2652,1	2870,5	3086,9	3300	3517,4	3725,9	3935,2	4150					
			L	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	980	980	62,27	
			ti	65	60	61	61	66	66	61	61	66	61	61	65	66	62	62	66	62	62	62	62	62	629	629		
8	Parameter an Maschine ändern Quittierung in Maschinensteuerung	1	F	203,2	410,3	618,6	825	1033,4	1236	1468	1671,4	1881,7	2088,5	2287,7	2509,8	2733,1	2935,5	3143,9	3357	3579,4	3787,9	4002,2	4212					
			L	100	100	95	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	100	1005	1005	20,60		
			ti	20	21	20	20	21	20	20	21	21	20	20	21	20	20	20	21	20	20	20	21	21	205	205		
Summe der Zeiten je Zyklus			t <sub>z</sub>	225,2	206,1	207	206	215	216	209	203	206	211	208	207	213	207	214	218	211	209	214	211			213,37		
			in Min	3,75	3,44	3,46	3,44	3,59	3,60	3,49	3,43	3,52	3,46	3,45	3,55	3,62	3,46	3,57	3,64	3,52	3,48	3,57	3,51			3,56		

Tabelle 81: Zeitaufnahme, manueller Prozess

## 13.15.2 Zeitaufnahme, automatisierter Messprozess

Zeitaufnahme Analyseprozess Maschinenparameter automatisiert																												
Nr.	Ablaufabschnitt und Messpunkt	Menge		Zy- mz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ L/h	L ti	t <sub>Σ</sub> L/1000h	
1	SPS-Temperaturübersicht öffnen Übersicht geladen																											
		L	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	10,0	0,08
		ti	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,8	
		F	8	111	132	273	354	441	528	609	690	773	855	936	1017	1097	1179	1262	1343	1425	1507	1588						
2	Twin-Cat Scope Öffnen Ablage Schreiber																											
		L	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	10,0	0,05	
		ti	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,5		
		F	13	111	132	273	354	441	528	609	690	773	855	936	1017	1097	1179	1262	1343	1425	1507	1588						
3	Vorprogramm Variablen Browser öffnen letzte Bestätigung mit ENTER																											
		L	110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	11,0	0,09	
		ti	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0,8		
		F	21	111	132	273	354	441	528	609	690	773	855	936	1017	1097	1179	1262	1343	1425	1507	1588						
4	Messung in PLC Starten (Mittelwertbildung) Record Funktion Button																											
		L	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	10,0	0,05	
		ti	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,5		
		F	26	111	132	273	354	441	528	609	690	773	855	936	1017	1097	1179	1262	1343	1425	1507	1588						
5	Messung in Twin-Cat Scope Starten bestätigen mit ENTER (optional wenn Handlung erforderlich)																											
		L	105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	105	10,5	0,05	
		ti	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0,5		
		F	31	111	132	273	354	441	528	609	690	773	855	936	1017	1097	1179	1262	1343	1425	1507	1588						
6	Hingehen zur Maschine, Produkte kontrollieren Ablage letztes Produkt in Kasten																											
		L	100	100	100	90	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	990	99,0	61,28
		ti	60	60	61	61	66	66	61	61	62	61	61	60	60	62	62	60	62	60	62	60	62	60	62	619	61,9	
		F	31	171	253	334	420	507	589	670	752	834	916	996	1077	1159	1241	1322	1405	1487	1567	1650						
7	Parameter an Maschine ändern Quittierung in Maschinensteuerung																											
		L	100	100	95	100	110	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1005	100,5	20,60	
		ti	20	21	20	20	21	21	20	21	21	20	21	20	21	20	21	21	20	21	21	20	21	21	205	20,5		
		F	111	132	273	354	441	528	609	690	773	855	936	1017	1097	1179	1262	1343	1425	1507	1588	1671						
Summe der Zeiten je Zyklus		t <sub>Σ</sub>	1111	81	81	81	87	87	81	81	83	82	81	81	80	82	83	81	82	82	81	83				82,20		
		in Min	1,85	1,35	1,35	1,35	1,45	1,45	1,35	1,35	1,38	1,37	1,35	1,35	1,33	1,37	1,38	1,35	1,37	1,37	1,35	1,38				1,37		

Tabelle 82: Zeitaufnahme, automatisierter Prozess

### 13.15.3 Statistische Absicherung, manueller Prozess

Auswertung; Berechnung des $\epsilon$						
Formel		Einheit				Wert
$\bar{t}_z = \Sigma(t_z/n)$	Mittelwert Zykluszeiten	s	$(t_z) =$	4233,00	n=	20
$S_z^2 = (1/n-1) * (\Sigma(t_z^2) - (1/n) * (\Sigma t_z)^2)$	Varianz		$(t_z^2) =$	896405,82		25,86
$S_z = \sqrt{S_z^2}$	Standardabweichung		$\delta_z =$	$(S_z^2)^{(1/2)}$		5,09
$v = S/\bar{t}_z$	Variationszahl	%	Wert	0,0240		2,40
$\epsilon$ aus Leitertafel	Vertrauensbereich	%				1,2
<b>Auswertung des <math>\epsilon</math></b>						
$(t_z)$	211,65 s					
$(t_z) - \epsilon$	209,11 s					
$(t_z) + \epsilon$	214,19 s					
<b>Bemerkung</b>						
Der Vertrauensbereich um die mittlere Zykluszeit $t_z$ umfasst mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95% ein Intervall von $\epsilon = \pm 15\%$ . Der wahre, jedoch unbekannte Mittelwert $t_z$ der Grundgesamtheit aller Zyklen liegt zwischen 209,11s und 214,19s. Über ein $\epsilon$ wird keine Aussage getroffen, da die Zeitaufnahme ausschließlich für die Diplomarbeit verwendet wird.						

Tabelle 83: Statistische Absicherung manueller Prozess nach REFA

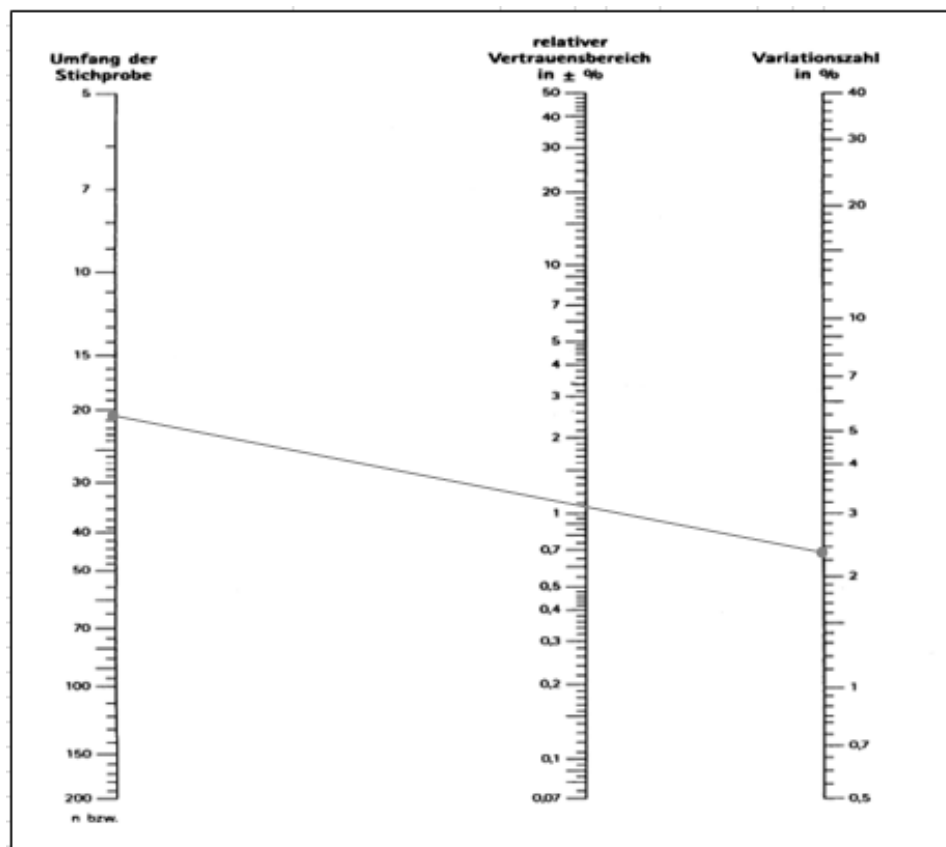


Abbildung 145: Vertrauensbereich Zeitaufnahme manueller Prozess



### 13.15.4 Statistische Absicherung, automatisierter Prozess

Auswertung: Berechnung des $\epsilon$						
Formel		Einheit				Wert
$\bar{t}_z = \sum(t_z/n)$	Mittelwert Zykluszeiten	s	$(t_z) =$	1671	n= 20	83,55
$S_z^2 = (1/n-1) \cdot (\sum(t_z^2) - (1/n) \cdot (\sum t_z)^2)$	Varianz		$(t_z^2) =$	140471,00		45,21
$S_z = \sqrt{S_z^2}$	Standardabweichung		$\bar{\sigma}_z =$	$(S_z^2)^{(1/2)}$		6,72
$v = S/\bar{t}_z$	Variationszahl	%	Wert	0,0805		8,05
$\epsilon$ aus Leitertafel	Vertrauensbereich	%				3,8
Auswertung des $\epsilon$						
$(t_z)$		83,55 s				
$(t_z) - \epsilon$		80,38 s				
$(t_z) + \epsilon$		86,72 s				
Bemerkung						
Der Vertrauensbereich um die mittlere Zykluszeit $t_z$ umfasst mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von 95% ein Intervall von $\epsilon = \pm 4\%$						
Der wahre, jedoch unbekannte Mittelwert $t_z$ der Grundgesamtheit aller Zyklen liegt zwischen 80,38s und 86,72s.						
Über ein $\epsilon$ wird keine Aussage getroffen, da die Zeitaufnahme ausschließlich für die Diplomarbeit verwendet wird.						

Tabelle 84: Statistische Absicherung automatisierter Prozess

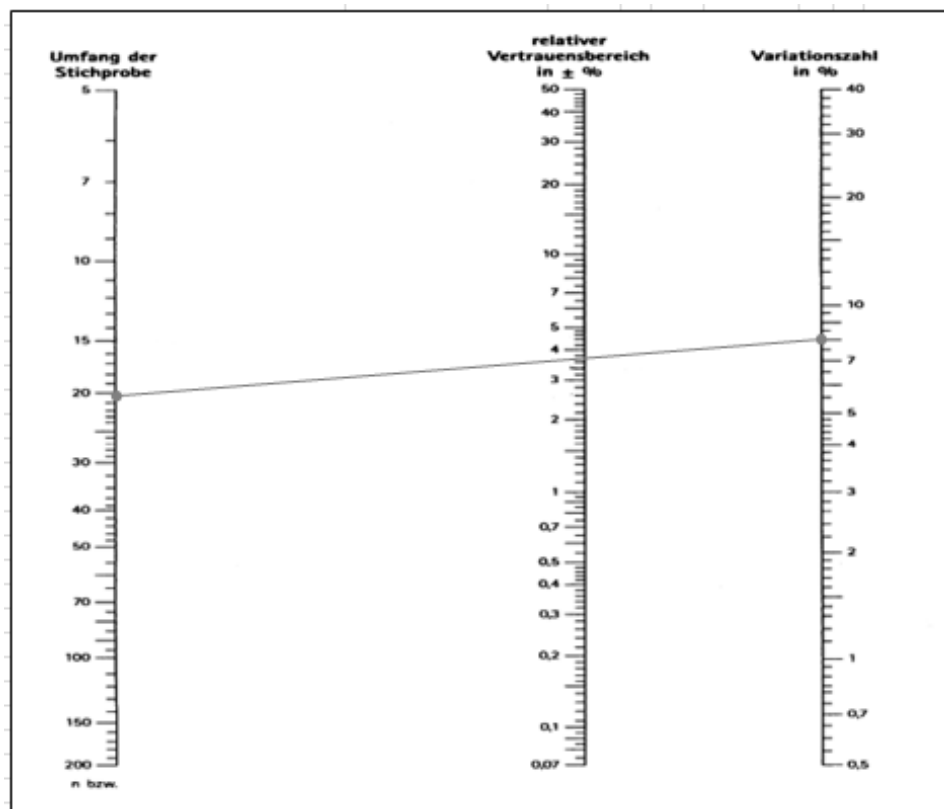


Abbildung 146: Vertrauensbereich Zeitaufnahme automatisierter Prozess

### 13.15.5 Planung und Durchführung der Zeitaufnahmen

Zur genauen Ermittlung der Prozesszeiten in diesem Arbeitsabschnitt wird in Abstimmung mit der Abteilung und nach Aufklärung der Mitarbeiter eine Zeitstudie durchgeführt. Für die Ermittlung der Prozesszeiten werden bestimmte Messpunkte festgelegt [47, 48]. Um eine Zeitstudie durchführen zu können, wird der Leistungsgrad pro Arbeitsschritt zusätzlich zu der pro Arbeitsschritt aufgenommenen Zeit beurteilt. Die Beurteilung erfolgt nach der Beobachtung mehrerer Zyklen und Abschätzung einer durchschnittlichen Arbeitsgeschwindigkeit [47]. Die in der Zeitaufnahme ermittelten Werte entnehmen Sie den Tabellen weiter unten. Es ergibt sich eine Zeit je Einheit für die Arbeitsvorgänge je Stück und eine gesamte Auftragszeit (für die gesamte Stückzahl je Auftrag) unter Einberechnung der Rüstvorgänge.

Der eigentliche Arbeitsvorgang wird durch zehn oder 20 Zeitmessungen ermittelt. Auch das Laden der Applikationen wird genauso wie das eigentliche Ausführen durch menschliches Handeln mit einberechnet.

### 13.15.6 Begriffe und Erklärungen<sup>61</sup>

#### Definition Zeitaufnahme

Eine Zeitaufnahme wird nach REFA folgendermaßen definiert: „Zeitaufnahmen bestehen in der Beschreibung des Arbeitssystems, im Besonderen des Arbeitsverfahrens, der Arbeitsmethode und der Arbeitsbedingungen und in der Erfassung der Bezugsmengen, der Einflussgrößen, der Leistungsgrade und Ist-Zeiten für einzelne Ablaufabschnitte; deren Auswertung ergeben Sollzeiten für bestimmte Ablaufabschnitte“ [47].

#### Definition Einzelzeit

„Einzelzeit  $t_i$  ist die Dauer eines einzelnen Ablaufabschnittes“ [47].

#### Definition Fortschrittszeit

„Fortschrittszeiten (F) sind Zeiten zwischen dem Beginn der Zeitaufnahme und dem Endereignissen der einzelnen Ablaufabschnitte“ [47].

#### Definition Messpunkt

„Der Messpunkt bei Zeitaufnahmen ist stets das Endereignis eines Ablaufabschnittes; es wird durch ein Vorgangselement gekennzeichnet“ [47].

---

<sup>61</sup> Die folgenden „Formeln der Zeitberechnungen“ werden nur zur Erklärung aufgeführt, deshalb nicht als nummerierte Gleichungen in die Dissertation aufgenommen.

**Definition Zyklus**

„Zyklus ist der Vorgang, der sich bei gleicher Abschnittsfolge mehrfach wiederholt“ [47].

**Definition Leistungsgrad**

„Der Leistungsgrad drückt das Verhältnis von beeinflussbarer Ist- zur beeinflussbaren Bezugs-Mengenleistung in Prozent aus“ [47].

**Definition Leistungsgradbeurteilung**

„Das Leistungsgradbeurteilen besteht darin, dass der Arbeitstudienmann das Erscheinungsbild des Bewegungsablaufes beobachtet und mit dem Bild des vorgestellten Bewegungsablaufes vergleicht, um aus diesem Vergleich einen Schluss auf die mutmaßlich erreichte Mengenleistung im Verhältnis zur Bezugs-Mengenleistung zu ziehen“ [47].

Weitere Information sind der entsprechenden Fachliteratur „REFA Methodenlehre“ zu entnehmen.

**Definition Auftragszeit**

„Die Auftragszeit T ist die Vorgabezeit für das Ausführen eines Auftrages durch einen Menschen“ [47].

Es gilt:  $T = t_r + m \cdot t_e$  (Rüstzeit + Auftragsmenge \* Zeit je Einheit)

**Definition Rüstzeit:**

„Die Rüstzeit  $t_r$  ist die Vorgabezeit für das Rüsten innerhalb eines Auftrags durch den Menschen“ [47].

Es gilt:  $t_r = t_{rg} + t_{rer} + t_{rv}$  (Rüstgrundzeit + Rüsterholzeit + Rüstverteizeit)

**Definition Zeit je Einheit**

„Die Zeit je Einheit  $T_e$  ist die Vorgabezeit für die Ausführung eines Ablaufes, durch den Menschen; sie bezieht sich im Allgemeinen auf die Mengeneinheit 1, 100, 1000“ [47].

Es gilt:  $t_e = t_g + t_{er} + t_v$  (Grundzeit + Erholzeit + Verteizeit)

**Definition Grundzeit**

„Die Grundzeit  $t_g$  besteht aus der Summe der Soll-Zeiten von Ablaufabschnitten, die für die planmäßige Ausführung eines Ablaufes durch den Menschen erforderlich sind; sie bezieht sich auf die Mengeneinheit 1“ [47].

**Definition Verteilzeit**

„Die Verteilzeit  $t_v$  besteht aus der Summe der Soll-Zeiten aller Ablaufabschnitte, die zusätzlich zur planmäßigen Ausführung eines Ablaufes durch den Menschen erforderlich sind; sie bezieht sich auf die Mengeneinheit 1“ [47].

**13.15.7 Ablauf einer Zeitaufnahme**

Folgende Abschnitte werden in der Literatur [47] für eine Istaufnahme durchlaufen:

1. Der Verwendungszweck der Zeitaufnahme wird festgelegt.
2. Das Messverfahren der Zeitmessung wird festgelegt.
3. Ein geeignetes Zeitmessgerät wird ausgewählt.
4. Die Arbeitsaufgabe und das Arbeitsverfahren werden beschrieben.
5. Der Arbeitsablauf wird in Abschnitte gegliedert, Messpunkte werden festgelegt.
6. Bezugsmengen und Einflussgrößen werden erfasst.
7. Die Zeitaufnahme wird durchgeführt, Istzeiten und Leistungsgrade werden erfasst.
8. Die Zeitaufnahme wird ausgewertet.

Vor der Durchführung der Zeitaufnahmen werden die betroffenen Mitarbeiter und die betroffene Abteilungsleitung aufgeklärt, ein geeigneter Beobachtungsstandort gewählt und Maßnahmen zur Einhaltung der Sicherheitsvorschriften bei der Aufnahme ergriffen.

Um den Abschnitt kurz zu halten, werden die o. g. acht Punkte [47] einmalig für alle Prozesse kurz an einem Beispiel beschreiben.

1. Verwendungszweck: Zweck der Zeitaufnahmen ist die Ermittlung der Vorgabezeit ausgewählter Prozesse im Istzustand. Es besteht die Notwendigkeit einer quantitativen Erfassung der Prozesse. Die in den Zeitaufnahmen ermittelten Vorgabezeiten werden mit den Vorgabezeiten im Umsetzungsabschnitt verglichen, um quantitative Verbesserungsergebnisse bewerten zu können.
2. Messverfahren: Die Zeitaufnahme wird in einer Einzelzeitmessung durchgeführt. Die verwendete Stoppuhr zeigt die Einzelzeiten (jedes Ablaufabschnitts) nach jeder Betätigung an.
3. Messgerät: Als Messgerät dient die in der Abteilung zugelassene Stoppuhr.
4. Arbeitsaufgabe, -verfahren, -methode, -bedingungen: Die Arbeitsaufgabe ist das Auswerten der Daten an der Messeinrichtung. Es handelt sich bei dem Fertigungsverfahren um ein automatisiertes Verfahren der Maschine, Maschinenfertigung (Zyklus) und bei dem Effizienzmessverfahren um ein Handanalyseverfahren. Der Arbeitsablauf erfolgt in der ersten Lösung manuell und bei der zweiten Lösung (halb-)automatisiert, Die Arbeitsbedingungen von

Auftrag zu Auftrag sind gleich. Die Einflüsse durch die Arbeitsumwelt bzgl. Lärm, Geruch und Arbeitsbeleuchtung sind zufriedenstellend, da in der Nähe der Arbeitsplätze keine größeren Maschinenanlagen (Pumpenhäuser) laufen (nur die eine Maschine) und alle Arbeitsplätze gut beleuchtet sind.

5. Gliederung des Arbeitsablaufs in Abschnitte: Alle Arbeitsabläufe werden in Arbeitsabschnitte gegliedert. Die entsprechenden Arbeitsabschnitte sind dem Aufnahmebogen zu entnehmen.
6. Bezugsmengen und Einflussgrößen: In jedem Zyklus wird ein Produktionsteil gefertigt. Die in der Zeitaufnahme aufgenommenen Einzelzeiten beziehen sich immer auf ein Produktionsteil oder automatisiert auf eine Reihe von Produktionsteilen. Die Abstände zwischen Werkzeugen, Hilfsmittel und Montagebauteil variieren NICHT. Eine grobe Darstellung der Arbeitsplätze entnehmen Sie bitte dem Laborplan.
7. Durchführung der Zeitaufnahme: Zur Beurteilung des Leitungsgrades werden die Abläufe vor der eigentlichen Aufnahme mehrmals beobachtet, um eine Bezugsleitung bilden zu können. Anschließend werden die Istzeiten der Analyseprozesse manuell und automatisiert aufgenommen.
8. Auswertung: Es erfolgt die Auswertung der Zeitaufnahme mit der Aufstellung der Sollzeiten auf dem Aufnahmebogen und einer anschließenden statistischen Auswertung. Prozessspezifische Einzelheiten sind den Zeitaufnahmen zu entnehmen. Im folgenden Abschnitt wird das Thema der Auswertung der Zeitaufnahme genauer erläutert.
9. Auswertung der Zeitaufnahmen

Zur Auswertung der Zeitaufnahmen müssen folgende zwei Begriffe vorab erläutert werden: Der Begriff der „Grundgesamtheit“ und der Begriff der „Stichprobe“.

### **13.15.8 Begriffe und Erklärungen**

#### **Definition Grundgesamtheit**

„[...] Man bezeichnet im Zusammenhang mit Zeitaufnahmen als Grundgesamtheit die Summe aller möglichen Wiederholungen (Zyklen), in denen der zu untersuchende Ablauf vorkommen kann“ [47].

#### **Definition Stichprobe**

„Mit Stichprobe bezeichnet man die Anzahl einiger weniger tatsächlich gemessener Wiederholungen des Ablaufes im Rahmen der Zeitaufnahme“ [47].

### 13.15.9 Verfahren zur Auswertung der Zeitaufnahmen

Zur Zeitaufnahme wird folgende Fragestellung angesprochen: Eine Anzahl von in einer Zeitaufnahme gemessenen Einzelzeiten liefert einen Mittelwert. Kann dieser Mittelwert als Mittelwert für den gesamten Auftrag oder nachfolgende Aufträge gleicher Art verwendet werden? Um durch eine aus der Grundgesamtheit entnommenen Stichprobe durch deren Stichprobenergebnis auf die nicht weiter untersuchte Grundgesamtheit schließen zu können werden bestimmte Verfahren der Technischen Statistik angewandt.

Das REFA-Standardprogramm beschreibt die Ermittlung des relativen Vertrauensbereiches im Streuzahlverfahren. Verstanden wird unter dem relativen Vertrauensbereich der Schwankungsbereich um den Mittelwert einer Stichprobe. In dem Schwankungsbereich wird der gesuchte, unbekannte Mittelwert einer Stichprobe zu finden sein. Das mathematische Kurzzeichen für den relativen Vertrauensbereich ist ein  $\epsilon$ . Dieser relative Vertrauensbereich wird als Istwert mit einem vorgegebenen Sollwert  $\epsilon'$  verglichen. Über die Höhe des Sollwertes  $\epsilon'$  sind im Unternehmen Vereinbarungen zu treffen, denn die Höhe des  $\epsilon'$  hängt vom Verwendungszweck der Zeitaufnahme ab. Die REFA-Methodenlehre gibt folgende Ansätze vor:

„Unter einem engen Streumaß kann man bei Zykluszeiten  $t_z$  in der Serienfertigung beispielsweise  $\epsilon' < 5\%$  verstehen; mittlere Streumaße liegen bei  $\epsilon' = 5\%$  bis  $10\%$ ; von hoher Messunsicherheit kann man beispielsweise bei  $\epsilon' > 10\%$  sprechen. Bei wenig aufgenommenen Zyklen sind häufig  $\epsilon'$ -Werte von  $20\%$  und mehr anzutreffen“ [47]. Weitere Einzelheiten zum Auswertungsvorgang sind der Fachliteratur zu entnehmen.

## 13.16 Messprotokoll Durchflussreduzierung, Übersichtstabelle

Messung vom 14.07.15		Versuch 1a	Versuch 1b	Mittel V 1	Versuch 2a	Versuch 2b	Versuch 2c	Mittel V 2	Versuch 3a	Versuch 3b	Versuch 3c	Mittel V 3
p Vorl. (Überdruck)	bar	3,55	3,54	3,55	3,60	3,59	3,80	3,70	3,68	3,68	3,90	3,75
p Rückl. (Überdruck)	bar	0,32	0,33	0,33	0,29	0,28	0,28	0,28	0,23	0,25	0,09	0,19
Vorlauftemperatur	°C	20,20	20,20	20,20	20,40	20,40	20,40	20,40	20,30	20,30	20,30	20,30
Rücklauftemperatur	°C	20,50	20,50	20,50	20,90	21,00	21,00	21,00	21,40	21,40	21,40	21,40
Volumenstrom 1 Kanal A	l/min	9,1	9,1	9,1	4,3	4,1	4,2	4,2	2,2	2,1	2,1	2,1
Drossel 1 Kanal A		-	-	-	2mm	2mm	2mm	2mm	1,5mm	1,5mm	1,5mm	1,5mm
Widerstand 1 Berechnung	bar/(l/min) <sup>2</sup>	0,04	0,04	0,04	0,18	0,20	0,20	0,20	0,71	0,79	0,86	0,78
Durchmesser Kühlkanal 1	mm	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Fließgeschwindigkeit 1	m/s	5,4	5,4	5,4	2,5	2,4	2,5	2,4	1,3	1,2	1,2	1,3
Reynoldszahl 1 Berechn.	-	32088,4	32088,4	32088,4	15162,7	14457,4	14910,0	14633,7	7757,6	7405,0	7405,0	7522,6
Rücklauftemperatur Kanal A	°C	20,5	20,6	20,6	21,1	21,1	21,1	21,1	21,7	21,7	21,7	21,7
Volumenstrom 2 Kanal B	l/min	7,6	7,6	7,6	4,0	4,0	4,1	4,1	2,4	2,4	2,4	2,4
Drossel 2 Kanal B		-	-	-	2mm	2mm	2mm	-	1,5mm	1,5mm	1,5mm	1,5mm
Widerstand 2 Berechnung	bar/(l/min) <sup>2</sup>	0,06	0,06	0,06	0,21	0,21	0,21	0,21	0,60	0,60	0,66	0,62
Durchmesser Kühlkanal 2	mm	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Fließgeschwindigkeit 2	m/s	4,5	4,5	4,5	2,4	2,4	2,4	2,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Reynoldszahl 2 Berechn.	-	26799,1	26799,1	26799,1	14104,8	14104,8	14457,4	14381,1	8462,9	8462,9	8462,9	8462,9
Rücklauftemperatur Kanal B	°C	20,4	20,4	20,4	20,8	20,8	20,8	20,8	21,2	21,1	21,2	21,2
Volumenstrom 3 Kanal C	l/min	7,0	7,1	7,0	3,8	3,8	3,6	3,7	2,0	2,1	2,0	2,0
Drossel 3 Kanal C		-	-	-	2mm	2mm	2mm	2mm	1,5mm	1,5mm	1,5mm	1,5mm
Widerstand 3 Berechnung	bar/(l/min) <sup>2</sup>	0,07	0,06	0,07	0,23	0,23	0,27	0,25	0,30	0,79	0,94	0,88
Durchmesser Kühlkanal 3	mm	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Fließgeschwindigkeit 3	m/s	4,1	4,2	4,1	2,3	2,2	2,1	2,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Reynoldszahl 3 Berechn.	-	24558,5	24942,9	24750,7	13490,1	13322,6	12662,2	13002,4	6892,4	7336,8	7093,4	7107,5
Rücklauftemperatur Kanal C	°C	20,5	20,5	20,5	20,9	20,9	20,8	20,9	21,1	21,2	21,2	21,2

Tabelle 85: Messtabelle Versuch Durchflussreduzierung (1)

Wasseruhr Stand 1 (Gesamtwasserzähler)	I	773,0	49,0		290,0	368,0	462,0		754,0	682,0	722,0	
Wasseruhr Stand 1 (Gesamtwasserzähler)	I	900,0	70,0		328,0	407,0	485,0		767,0	716,0	750,0	
delta Zeit	min	5,4	0,9		3,1	3,3	1,9		2,0	5,2	4,3	
Gesamtvolumenstrom	l/min	23,7	23,8	23,7	12,1	11,9	11,9	11,9	6,6	6,6	6,5	6,5
Volumenstrom gesamt	l/min	23,7	23,8	23,7	12,1	11,9	11,9	11,9	6,6	6,6	6,5	6,5
Widerstand ges. Berechn.	bar/(l/min) <sup>2</sup>	0,0058	0,0057	0,0057	0,0225	0,0235	0,0249	0,0242	0,0803	0,0792	0,0899	0,0831
Gesamtwiderst. Aus Einzelwiderst.		0,005	0,005	0,005	0,024	0,024	0,024	0,024	0,082	0,082	0,082	
Volumenstrom aus Einzelmessung		24,8	24,7	24,8	11,6	11,6	12,0	11,8	6,5	6,5	6,8	
Differenz gemessener & theor. Volumenstrom		1,2	1,0	1,1	-0,5	-0,2	0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,3	
Wärmestrom	kW	0,495	0,497	0,496	0,422	0,497	0,497	0,497	0,502	0,504	0,499	0,502
Wärmestrom Kanal A	kW	0,106	0,106	0,106	0,111	0,111	0,114	0,113	0,150	0,134	0,150	0,145
Wärmestrom Kanal B	kW	0,106	0,114	0,114	0,114	0,111	0,114	0,113	0,150	0,134	0,150	0,145
Wärmestrom Kanal C	kW	0,146	0,148	0,147	0,133	0,132	0,100	0,116	0,109	0,130	0,126	0,122
delta t Gesamt	°C	0,30	0,30	0,30		0,60	0,60	0,60	1,10	1,10	1,10	1,100
delta t Kanal A	°C	0,3	0,4	0,35		0,7	0,7	0,70	1,4	1,4	1,4	1,40
delta t Kanal B	°C	0,2	0,2	0,20		0,4	0,4	0,40	0,9	0,8	0,9	0,85
delta t Kanal C	°C	0,3	0,3	0,30		0,5	0,4	0,45	0,8	0,9	0,9	0,90
Beschreibung												
Versuch 1 a-b	Kombinierte Messung ohne Reduzierung beim Spritzgießen											
Versuch 2 b-c	Kombinierte Messung mit 2mm Reduzierung beim Spritzgießen Versuch 2a vermutl. Ausreißer - wird nicht gewertet											
Versuch 3 a-c	Kombinierte Messung mit 1,5mm Reduzierung beim Spritzgießen											

Tabelle 86: Messtabelle Versuch Durchflussreduzierung (2)<sup>62</sup><sup>62</sup> Tabelle aus [16]

## 13.17 Wärmeübertragung ins Erdreich nach DIN EN ISO 13370

Wärmeübertragung zum Boden					
A	36 m <sup>2</sup>	Fläche			
P	24,0 m	Umfang Platte			
B'	3,0 m <sup>2</sup>	charakteristisches Maß	$B' = \frac{A}{0,5 P}$		
w	0,2 m	Wanddicke (keine Seitenwände)			$d_t = w + \lambda (R_{si} + R_t + R_{se})$
Rf (Beton)	0,05625 m <sup>2</sup> K / W	Wärmedurchlasswiderstand Bodenplatte			
Rsi	0,08333333 m <sup>2</sup> K / W	Schüttungen unterhalb Bodenplatte haben selben Wärmedurchlasswiderstand wie die Bodenplatte			
Rse	0 m <sup>2</sup> K / W	äußerer Wärmeübergang			
lamda	2,0 W/m/K	Erdreich			Bei $d_t < B'$ (ungedämmte und leicht gedämmte Bodenplatten) gilt:
dt	0,4792 m	wirksame Dicke der Bodenplatte	$U = \frac{2 \lambda}{\pi B' + d_t} \ln \left( \frac{\pi B'}{d_t} + 1 \right)$		
wirksame Dicke: Dicke einer vergleichbaren Erdschicht					
U	1,22320551 W/m <sup>2</sup> /K	Wärmedurchgangskoeffizient, für un- bzw. leichtgedämmte Bodenplatten			
teta i	26,5 °C				
teta e	15,0				
Phi = °Q	0,50640708 kW	$\Phi = H_g (\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_e)$			
nach DIN EN ISO 13370, Seite 47, Siehe Anhang CD - DIN EN ISO 13370.pdf					

Tabelle 87: Wärmeübertragung ins Erdreich, Raumbilanz<sup>63</sup>

## 13.18 Programmtexte, automatisierte Leistungsmessung

### 13.18.1 Programmtexte, Auszug Stromzähler

```

0001 R_Trig200(clk:=bStop_Messung_Mittelwert, Q=>);
0002 R_Trig300(clk:=bStart_Messung_Mittelwert, Q=>);
0003
0004 (*Bezugsgröße ermitteln, wieviel Leistung pro Impuls*)
0005
0006 Pulswertigkeit := Wandlerfaktor / PulseProKW;
0007
0008 (*Start der Energieerfassung bei Pulswertigkeit >0*, Bezug von Impulsen auf Zeitzähler*)
0009
0010 IF Pulswertigkeit > 0.0 THEN
0011     IF Puls THEN
0012         IF Flanke_01 = FALSE THEN
0013             Zeit := Tempzeit;
0014             Tempzeit := 0;
0015             Flanke_01 := TRUE;
0016             Temp_Zaehler:=Temp_Zaehler+Pulswertigkeit;
0017         END_IF
0018     ELSE
0019         Flanke_01 := FALSE;
0020     END_IF
0021
0022 (*Zeitähler, Abh. von Taktzeit*)
0023 Tempzeit := Tempzeit + CPUZyklus;
0024
0025 temp_1 := Zeit / 1000;
0026 temp_2 := 3600.0 / temp_1;
0027
0028 (*Berechnung der Leistung aus Zeit * Pulswertigkeit*)
0029 AktuelleLeistung := temp_2 * Pulswertigkeit;

```

Abbildung 147: Funktionsblock „Stromzähler“

<sup>63</sup> Vorlage DIN EN ISO 13370 und Grewing, M., Pöppelmann, Lohne 2014



### 13.18.2 Programmtexte, Auszug Wärmemengenzähler

```

0013
0014 (*Berechnung kWh + Wärmearbeit hochzählen, falsche Bezeichnung: Arbeit statt Leistung in ms*)
0015 rWaermeleistungin10ms := rWaermeleistung / 3600 / 100;
0016 rKomulativerWaermearbeit := rWaermeleistungin10ms + rKomulativerWaermearbeit;
0017
0018 (*die Zählung erfolgt auf eine kWh genau*)
0019 IF rKomulativerWaermearbeit >= 1 THEN
0020     diWaermearbeit := diWaermearbeit + 1;
0021     rKomulativerWaermearbeit := rKomulativerWaermearbeit - 1.0;
0022 END_IF
0023
0024 (*Impulse in Liter umrechnen*)
0025 IF bVolumenimpuls THEN
0026     IF bFlanke_01 = FALSE THEN
0027         diZeit := diTempzeit;
0028         diTempzeit := 0;
0029         bFlanke_01 := TRUE;
0030         rPulszaehler_temp := rPulszaehler_temp + rPulswertigkeit;
0031         rVolumen := (rAktuellerVolumenstrom * 1000) / 3600;
0032         rWaermeleistung := rVolumen * rDichte * rspezifische_Waermekapazitaet * rMitteldelta; (*Formel Wärmeleistung*)
0033
0034     END_IF
0035 ELSE
0036     bFlanke_01 := FALSE;
0037 END_IF
0038
0039 (*Leistung pro s für höhere Auflösung*)
0040 rhochaufloesend_Waermeleistung_in_s := (rPulswertigkeit * 0.001 / ((diZeit + 0.0001) * 0.001)) * rDichte * rspezifische_Waermekapazitaet * rdelta;
0041 (*Wärmeleistung in kW, Umrechnung Liter in m³; Umrechnung ms in s, diZeit + 0.0001 wegen DIV durch 0*)
0042
0043 (*Berechnung Volumenstrom pro s*)
0044 rVolumenstrom_s := (rPulswertigkeit / ((diZeit + 0.0001) * 0.001));
0045 (*Umrechnung Liter in m³; Umrechnung ms in s, diZeit + 0.0001 wegen DIV durch 0*)
0046 rVolumenstrom_min := rVolumenstrom_s * 60;
0047

```

Abbildung 148: Funktionsblock „Wärmemengenzähler“

### 13.18.3 Programmtexte, Auszug Wärmemengenzähler

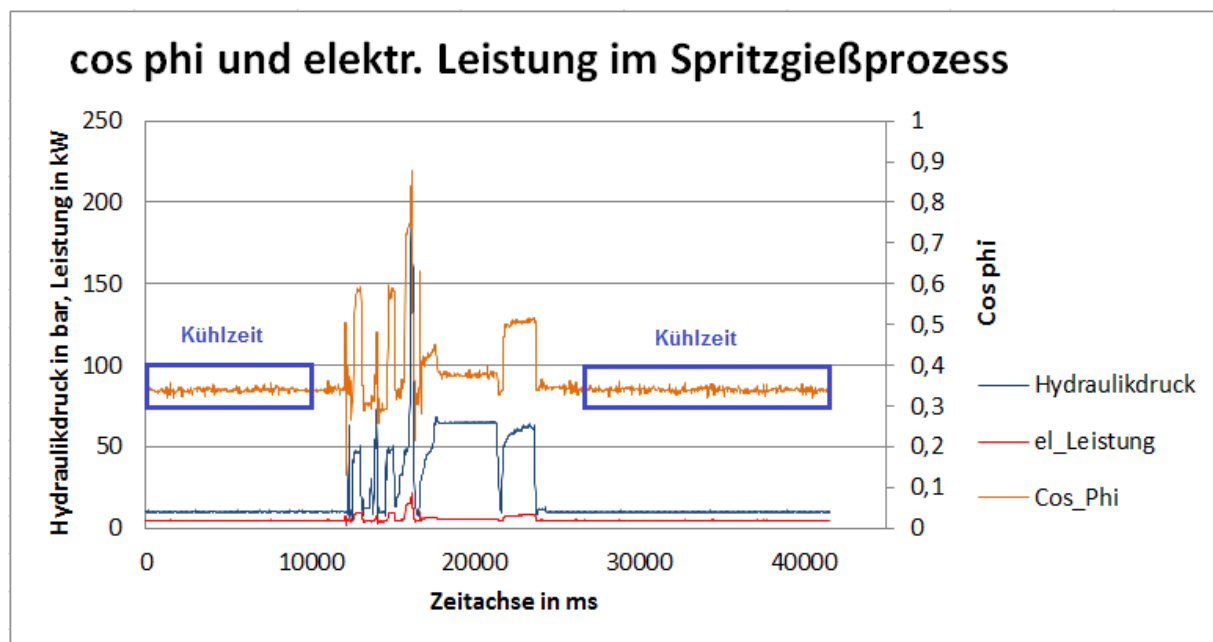
```

0001 (*Start/Stop Messung*)
0002 R_Trig21(CLK:=Start_Messung2, Q=>);
0003 R_Trig22(clk:=Stop_Messung2, Q=>);
0004
0005 (*Setze BOOL auf TRUE bei Trigger21 Flanke*)
0006 IF R_Trig21.Q THEN
0007     b_aufnehmen2 := TRUE;
0008 END_IF
0009 (*zwischenwert des hydr. Drucks multipliziert mit der Kolbenfläche bei Trigger Flanke, danach BOOL = False*)
0010 IF R_Trig22.Q THEN
0011     r_w := r_zwischenwert * r_ak;
0012     b_aufnehmen2 := FALSE;
0013     r_w_ges := r_w;
0014 END_IF
0015
0016 (*setzt Größen auf 0 für nächste Messung*)
0017 IF R_TRIG21.Q THEN
0018     Erster_Wegwert := Wegwert;
0019     r_zwischenwert := 0;
0020     akt_Wegwert := Wegwert;
0021     r_w := 0;
0022 END_IF
0023
0024 (*Bildung der Wegdifferenz für kum. Flächenberechnung unter der Kurve, wenn BOOL = TRUE ist
0025 Bezugsgröße letzter gefahrener Weg*)
0026 IF b_aufnehmen2 THEN
0027     akt_Wegwert := Wegwert;
0028     diff_Wegwert := akt_Wegwert - Erster_Wegwert;
0029     IF diff_Wegwert <> 0 AND Druck_HY <> 0 THEN
0030         r_zwischenwert := r_zwischenwert + diff_Wegwert * Druck_HY;
0031
0032     Erster_Wegwert := Wegwert;
0033 END_IF
0034 END_IF
0035

```

Abbildung 149: Funktionsblock „Kumulierte Leistungsmessung“

### 13.19 Diagramm: Zusammenhang der elektrischen Leistung, Hydraulikdruck und Leistungsfaktor $\cos\phi$

Abbildung 150: Diagramm Leistungsfaktor  $\cos\phi$ 

### 13.20 Zykluszeiten mit unterschiedlichen Ölen

Zykluszeiten mit dem Shell Tellus S2						
Auszug						
Bezeich	Zykluszahl	Laufd.Nr.	Messzeit	Heizung		
Einheit		Stk	sec	Grad	Grad	
Istwerte	1	50258	35	211	215	
	2	50262	35	210	215	
	3	50266	35	210	215	
	4	50270	35	210	215	
	5	50274	35,1	210	215	
Zykluszeiten mit dem Shell Tellus S4						
Auszug						
Bezeich	Zykluszahl	Laufd.Nr.	Messzeit	Heizung		
Einheit		Stk	sec	Grad	Grad	
Istwerte	1	69238	34,8	210	215	
	2	69242	34,8	210	215	
	3	69246	34,8	210	215	
	4	69250	34,8	210	215	
	5	69254	34,8	210	215	

Tabelle 88: Zykluszeiten mit unterschiedlichen Ölen, Auszug

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Energieprozesse .....	15
Abbildung 2: Energiebilanz einer Spritzeinheit (ohne Werkzeug) .....	17
Abbildung 3: Massenbilanz .....	19
Abbildung 4: Energiebilanz.....	20
Abbildung 5: Wärmeleitung .....	21
Abbildung 6: Konvektion .....	22
Abbildung 7: Wellenlänge $\lambda/\mu\text{m}$ im Strahlungsbereich .....	23
Abbildung 8: Strahlung.....	24
Abbildung 9: Elektrische Energieflüsse in der Industrie.....	25
Abbildung 10: Phasenunterschied von Strom- und Spannungskurve, verringerte Wirkleistung .....	26
Abbildung 11: Übersicht über die Bewegungsvorgänge .....	28
Abbildung 12: Wirkungsgradsteigerung mit Zunahme der Betriebsleistung.....	29
Abbildung 13: Kühltemperatur und Kühlprozesse in der Industrie.....	29
Abbildung 14: Lastganglinie am Wochentag, Spitzenlastbetrachtung.....	32
Abbildung 15: Energiemanagementsystem nach ISO 50001 .....	34
Abbildung 16: Übersicht Unternehmen, Werk1 .....	36
Abbildung 17: Spritzgießmaschine, schematischer Aufbau .....	39
Abbildung 18: Prozessablauf Spritzgussmaschine, Hydraulikdruckverlauf.....	42
Abbildung 19: Einflussgrößen auf den Einspritzvorgang.....	45
Abbildung 20: pvt-Diagramm Thermoplaste.....	47
Abbildung 21: Energiebilanz der Spritzgieß-Teilprozesse .....	48
Abbildung 22: Flächenbestimmung der Einspritzarbeit.....	49
Abbildung 23: Aufbau des Werkzeugs mit Kühlmitteldurchlauf.....	52
Abbildung 24: Strömung durch Kühlkanal.....	53
Abbildung 25: Übergang laminar zu turbulent.....	55
Abbildung 26: Durchflussmenge .....	56
Abbildung 27: Darstellung der Energie- und Leistungsformen .....	57
Abbildung 28: ABC-Analyse Flussdiagramm Halle 5.....	59
Abbildung 29: Maschinenplan Produktionshalle .....	59
Abbildung 30: Energieverbrauch der Spritzgießphasen.....	60
Abbildung 31: Unterschiedliche Antriebsarbeiten einer Spritzgießmaschine .....	61
Abbildung 32: Vergleich hydraulischer Antrieb zu elektrischem Antrieb der SGM .....	62
Abbildung 33: Energieanteile des Zyklus der SGM.....	63
Abbildung 34: Maschinenkosten über 15 Jahre .....	64
Abbildung 35: Qualitätsprognose über Prozessführung .....	65
Abbildung 36: Messwerte im Histogramm.....	68
Abbildung 37: Bewertung der MFU, Kriterien und Forderungen.....	69
Abbildung 38: Datenpunkte und Interpolation.....	70
Abbildung 39: Interpolation mit SCILAB Software .....	72
Abbildung 40: Programmschritt 2, numerische Integration .....	73
Abbildung 41: Einflüsse auf den Gesamtenergieverbrauch der Spritzgießmaschine .....	74
Abbildung 42: Einrichtung des Labors von der Firma Pöppelmann für die Dissertation .....	75
Abbildung 43: Schematischer Messauswertungsaufbau .....	75
Abbildung 44: DasyLab Benutzeroberfläche.....	76

Abbildung 45: DasyLab Funktionsbausteine .....	77
Abbildung 46: Beckhoff Messsystem .....	78
Abbildung 47: Beckhoff Systemmanager .....	78
Abbildung 48: Beckhoff PLC Control .....	79
Abbildung 49: Verarbeitungsprozess vom Spritzgießen zum Formteil .....	83
Abbildung 50: Laborraum, Maschine 1 .....	84
Abbildung 51: Laborraum, Maschine 2 .....	85
Abbildung 52: Laborplan .....	85
Abbildung 53: Schematischer Aufbau der Labormaschine .....	86
Abbildung 54: Durchflusssensoren der Firma SICK, Messung Formkühlung-Durchfluss .....	87
Abbildung 55: Durchflusssensoren Hydrauliköl .....	88
Abbildung 56: Beckhoff Labor-Messsystem mit Netzteil .....	89
Abbildung 57: Kalibrierung Öldurchfluss-Messsystem .....	89
Abbildung 58: Kalibrierung Durchflussturbinen.....	90
Abbildung 59: Kalibrierung Luftvolumenstrommessung, Diagramm Windgeschwindigkeit .....	91
Abbildung 60: Einspritzvolumen mit Integer-Wert aus SPS-Messklemme .....	92
Abbildung 61: Verlauf Hydraulikdruck und Einspritzweg.....	96
Abbildung 62: Einspritzarbeit, kumuliert in Scilab .....	97
Abbildung 63: Einspritzkurve mit Ausgleichsfunktion.....	97
Abbildung 64: Plastifizierarbeit, Ermittlung aus Vorversuchsreihen .....	99
Abbildung 65: Einspritzarbeit, Ermittlung aus Vorversuchsreihen .....	99
Abbildung 66: Infrarotbild Leerlauf, Pumpengehäuse .....	102
Abbildung 67: Scope Ansicht, Spritzgießprozess.....	108
Abbildung 68: Zuordnung Funktionsblock zu lokaler Variable.....	109
Abbildung 69: PLC Ansicht Raumbilanz (Arbeitswerte) .....	112
Abbildung 70: PLC Ansicht Raumbilanz (Leistungswerte) .....	113
Abbildung 71: PLC Ansicht Prozessbilanz (Einspritzen).....	114
Abbildung 72: PLC Ansicht Prozessbilanz (Plastifizieren) .....	115
Abbildung 73: PLC Ansicht Parameterübersicht (Temperaturen Druck) .....	116
Abbildung 74: PLC Ansicht Kalibrierwerte (Einstellungsseite) .....	117
Abbildung 75: Maschinensteuerung und Durchflussmessgerät .....	121
Abbildung 76: Leistungswerte Raumbilanz im Maschinentest .....	122
Abbildung 77: Datenmonitoring in SCOPE Software.....	123
Abbildung 78: Kalibrierung Temperaturfühler .....	124
Abbildung 79: Leckölmenge Regelpumpe, Tellus S2 Öl .....	126
Abbildung 80: Änderung der Hydraulikflüssigkeit Tellus S4.....	128
Abbildung 81: Änderung der Hydraulikflüssigkeit Mobil DTE10 EXCEL .....	128
Abbildung 82: Maschinensteuerung Kühlzeitänderung.....	129
Abbildung 83: Anzeige Zuhaltedruck.....	130
Abbildung 84: Scope Ansicht, Änderung Flanschdurchfluss .....	131
Abbildung 85: Ergebnisse Grundzustand Raumbilanz PPH9020 .....	133
Abbildung 86: Ergebnisse Grundzustand Raumbilanz PE1800H .....	134
Abbildung 87: Ergebnisse Einspritzen Materialvergleich .....	135
Abbildung 88: Ergebnisse Plastifizieren Materialvergleich .....	135
Abbildung 89: Ergebnisse Raumbilanz mit und ohne Heizungsisolierung .....	136

Abbildung 90: Ergebnisse Änderung der Heiztemperatur .....	137
Abbildung 91: Ergebnisse Einspritzarbeit bei Heizungstemperaturänderung .....	138
Abbildung 92: Ergebnisse Plastifizierarbeit bei unterschiedlichen Heizungstemperaturen .....	138
Abbildung 93: Ergebnisse Ölspülung mit Standardöl Tellus 46.....	139
Abbildung 94: Ergebnisse Einspritzarbeit mit Tellus S2 .....	140
Abbildung 95: Ergebnisse Plastifizierarbeit mit Tellus S2 .....	140
Abbildung 96: Ergebnisse Raumbilanz nach Öltausch Tellus S4 .....	141
Abbildung 97: Ergebnisse Einspritzarbeit nach Öltausch Tellus S4.....	142
Abbildung 98: Ergebnisse Plastifizierarbeit nach Öltausch Tellus S4.....	142
Abbildung 99: Ergebnisse Raumbilanz nach Öltausch Mobil DTE10 Excel.....	143
Abbildung 100: Ergebnisse Einspritzarbeit bei Öltausch Mobil DTE10 Excel.....	144
Abbildung 101: Ergebnisse Plastifizierarbeit bei Öltausch Mobil DTE10 Excel.....	144
Abbildung 102: Ergebnisse Vergleich Einspritzen Öltausch, Übersicht.....	145
Abbildung 103: Ergebnisse Vergleich Plastifizieren Öltausch, Übersicht.....	146
Abbildung 104: Ergebnisse Raumbilanz Öltausch, Übersicht.....	146
Abbildung 105: Ergebnisse mittlere Antriebsleistung bei Öltausch.....	147
Abbildung 106: Ergebnisse Kühlzeitänderung auf Antriebsleistung .....	147
Abbildung 107: Ergebnisse Schließkraftänderung auf Antriebsleistung .....	148
Abbildung 108: Ergebnisse Durchflussänderung Flansch auf Temperatur .....	149
Abbildung 109: Analyse Temperaturverlauf Heizung Grundzustand.....	153
Abbildung 110: Analyse Temperaturverlauf Heizung bei Temperaturerhöhung.....	153
Abbildung 111: Infrarotbild Leckölstrom Regelpumpe beim Einlaufen der Maschine .....	156
Abbildung 112: Infrarotbild Leckölstrom der Regelpumpe bei Öltemperaturerhöhung.....	157
Abbildung 113: Leckölmenge Einspritzen mit Tellus S2 Grundzustand vor Ölspülung.....	160
Abbildung 114: Einstellpunkte für Kumulationsvorgang.....	161
Abbildung 115: Infrarotbild mit Heizungsisolierung .....	163
Abbildung 116: Leckölmenge Regelpumpe Shell Tellus S4 .....	166
Abbildung 117: Leckölmenge Regelpumpe bei Mobil DTE10 Excel .....	169
Abbildung 118: Analyse Hydraulikdruck und Gesamtleistung mit Leistungsspitze .....	170
Abbildung 119: Analyse Leistungsspitzen im Scope.....	171
Abbildung 120: Zusammenhang Schließdruck, elektrischen Leistungsspitzen und Hydraulikdruck ..	171
Abbildung 121: Zusammenhang zwischen Zykluszeit und mittlerer Antriebsleistung .....	172
Abbildung 122: Zusammenhang zwischen Zykluszeit und Energieverbrauch pro Stück .....	173
Abbildung 123: Infrarotbild Durchflussänderung Flansch, Flanshtemperatur vorher .....	174
Abbildung 124: Infrarotbild Durchflussänderung Flansch, Flanshtemperatur nachher.....	174
Abbildung 125: Einfluss Ölkühlung auf Öltemperatur .....	175
Abbildung 126: Abweichungsanalyse Raumleistungen.....	176
Abbildung 127: Abweichungsanalyse Einspritzen.....	177
Abbildung 128: Abweichungsanalyse Plastifizieren .....	178
Abbildung 129: Kalibriertabelle mit relativer Fehlerangabe el. Leistungsmessung.....	182
Abbildung 130: Standardnormalverteilung mit oberer und unterer Toleranzgrenze.....	185
Abbildung 131: Häufigkeitsanalyse Innendurchmesser .....	186
Abbildung 132: Häufigkeitsanalyse Außendurchmesser.....	186
Abbildung 133: Abhängigkeit der Reynoldszahl von Durchflussreduzierung .....	188
Abbildung 134: Temperaturen Werkzeug vor Durchflussreduzierung .....	189

Abbildung 135: Temperaturen Werkzeug bei zu starker Durchflussreduzierung.....	190
Abbildung 136: Hydraulikplan Spritzgießmaschine.....	201
Abbildung 137: Verifizierung Plastifizierarbeit (1) .....	203
Abbildung 138: Verifizierung Plastifizierarbeit (2) .....	203
Abbildung 139: Scilab Verifizierung Plastifizierarbeit (1) .....	204
Abbildung 140: Scilab Verifizierung Plastifizierarbeit (2) .....	204
Abbildung 141: Kalibrierungstabelle für Dosiermotor zur Aufnahme Plastifizierarbeit .....	205
Abbildung 142: Sankey Versuchsraum .....	209
Abbildung 143: Sankey Einspritzarbeit.....	210
Abbildung 144: Sankey Plastifizierarbeit.....	211
Abbildung 145: Vertrauensbereich Zeitaufnahme manueller Prozess .....	228
Abbildung 146: Vertrauensbereich Zeitaufnahme automatisierter Prozess .....	229
Abbildung 147: Funktionsblock „Stromzähler“ .....	236
Abbildung 148: Funktionsblock „Wärmemengenzähler“ .....	237
Abbildung 149: Funktionsblock „Kumulierte Leistungsmessung“ .....	237
Abbildung 150: Diagramm Leistungsfaktor $\cos\varphi$ .....	238

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Laufende Energieeinsparungsmaßnahmen .....	36
Tabelle 2: Ablaufschritte und Einstellparameter, grundsätzliche Abfolge.....	41
Tabelle 3: ABC-Analyse Energieverbrauch Hallen Werk 1.....	58
Tabelle 4: Ausprägungen und Eigenschaften .....	71
Tabelle 5: Ausprägungen und Eigenschaften .....	80
Tabelle 6: Messsystemvergleich, Ausprägungen .....	81
Tabelle 7: Messsystemvergleich, Gewichtungsmatrix .....	81
Tabelle 8: Messsystemvergleich, Nutzwertberechnung .....	82
Tabelle 9: Labor Versuchseinrichtung, Parameter.....	83
Tabelle 10: Kalibrierungseinstellung Weggeber Einspritzweg .....	91
Tabelle 11: Proberechnung aus mit Verifizierungswerten der Kumulation.....	92
Tabelle 12: Vorversuchsreihe 1, Energiebilanz manuell Produktionsbetrieb .....	94
Tabelle 13: Vorversuchsreihe 2, Energiebilanz manuell Leerlauf .....	95
Tabelle 14: Leckölstrom Leerlauf Regelpumpe .....	100
Tabelle 15: Leckölstrom Leerlauf, Haltepumpe .....	101
Tabelle 16: Konvektion Leerlauf, Pumpengehäuse.....	101
Tabelle 17: Berechnung Antriebskomponenten im Leerlauf .....	103
Tabelle 18: Bilanzierung des Antriebs zum Raum, Leerlauf .....	103
Tabelle 19: Modellbildung, Prozessänderung vom Grundzustand .....	104
Tabelle 20: Modellbildung, Prozessänderung für Erwartung Effizienzverbesserung.....	105
Tabelle 21: Parametermessung, manuelle Lösung 1 .....	107
Tabelle 22: Parametermessung, automatisierte Lösung 2.....	107
Tabelle 23: Ausprägungen und Eigenschaften .....	118
Tabelle 24: Maschinenparameter, Monitoring .....	125
Tabelle 25: Maschinenparameter, Heizungstemperaturänderung.....	127
Tabelle 26: Analyse Parametertabelle Raumleistungen .....	151
Tabelle 27: Analyse Parametertabelle Einspritzarbeit .....	152
Tabelle 28: Analyse Parametertabelle Plastifizierarbeit .....	152
Tabelle 29: Analyse Berechnung der Aufschmelzenthalpie .....	154
Tabelle 30: Analyse Raumleistung Grundzustand und Öltemperaturerhöhungen.....	155
Tabelle 31: Analyse Einspritzen Grundzustand und Öltemperaturerhöhungen.....	155
Tabelle 32: Analyse Plastifizieren Grundzustand und Öltemperaturerhöhungen .....	156
Tabelle 33: Analyse Auswirkungen Raumleistungen bei Materialtausch .....	158
Tabelle 34: Analyse Einspritzen Auswirkungen bei Materialtausch.....	158
Tabelle 35: Analyse Plastifizieren Auswirkungen bei Materialtausch.....	159
Tabelle 36: Analyse Raumbilanz, Auswirkungen der Heizungsisolierung .....	162
Tabelle 37: Analyse Einspritzen, Auswirkungen der Heizungsisolierung .....	162
Tabelle 38: Analyse Plastifizieren Auswirkungen der Heizungsisolierung .....	163
Tabelle 39: Analyse Raumbilanz Auswirkungen Öltausch zu Shell Tellus S4.....	164
Tabelle 40: Analyse Einspritzen Auswirkungen Öltausch zu Tellus S4 .....	165
Tabelle 41: Analyse Plastifizieren Auswirkungen Öltausch zu Tellus S4 .....	165
Tabelle 42: Analyse Raumbilanz Auswirkungen Öltausch zu Mobil DTE10.....	167
Tabelle 43: Analyse Einspritzen Auswirkungen Öltausch zu Mobil DTE10.....	168
Tabelle 44: Analyse Plastifizieren Auswirkungen Öltausch zu Mobil DTE10.....	168

Tabelle 45: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse Raumbilanz (Tabellenauszug) .....	175
Tabelle 46: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse bei Ölwechsel (Tabellenauszug) .....	176
Tabelle 47: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse Einspritzen .....	177
Tabelle 48: Gegenüberstellung Parameter, Fehleranalyse Plastifizieren .....	178
Tabelle 49: Plausibilitätsprüfung Ergebnisse Raumbilanz .....	180
Tabelle 50: Plausibilitätsprüfung Ergebnisse Einspritzen .....	180
Tabelle 51: Plausibilitätsprüfung Ergebnisse Plastifizieren .....	181
Tabelle 52: Ergebnisse Messung Durchflussreduzierung .....	187
Tabelle 53: Manueller Prozess, Zeitaufnahme .....	191
Tabelle 54: Automatisierter Prozess Zeitaufnahme .....	191
Tabelle 55: Labor Versuchseinrichtung, Parameter (2) .....	202
Tabelle 56: Kalibrierungstabelle Messturbinen für Ölvolumenstrom (1) .....	205
Tabelle 57: Kalibrierungstabelle Messturbinen für Ölvolumenstrom (2) .....	206
Tabelle 58: Messung Volumenstrom in Versuchsraum .....	207
Tabelle 59: Leistungswerte und Prozentanteile im Leerlauf .....	208
Tabelle 60: Parametertabelle Raumbilanz (1) .....	212
Tabelle 61: Parametertabelle Raumbilanz (2) .....	213
Tabelle 62: Parametertabelle Einspritzen (1) .....	214
Tabelle 63: Parametertabelle Einspritzen (2) .....	215
Tabelle 64: Parametertabelle Plastifizieren (1) .....	216
Tabelle 65: Parametertabelle Plastifizieren (2) .....	217
Tabelle 66: Abweichungsanalyse Raumbilanz (1) .....	218
Tabelle 67: Abweichungsanalyse Raumbilanz (2) .....	218
Tabelle 68: Abweichungsanalyse Raumbilanz (3) .....	219
Tabelle 69: Abweichungsanalyse Raumbilanz (4) .....	219
Tabelle 70: Abweichungsanalyse Einspritzen (1) .....	220
Tabelle 71: Abweichungsanalyse Einspritzen (2) .....	220
Tabelle 72: Abweichungsanalyse Einspritzen (3) .....	221
Tabelle 73: Abweichungsanalyse Einspritzen (4) .....	221
Tabelle 74: Abweichungsanalyse Plastifizieren (1) .....	222
Tabelle 75: Abweichungsanalyse Plastifizieren (2) .....	222
Tabelle 76: Abweichungsanalyse Plastifizieren (3) .....	223
Tabelle 77: Abweichungsanalyse Plastifizieren (4) .....	223
Tabelle 78: Produktmessungen, Varianzberechnung und Toleranzen .....	224
Tabelle 79: Häufigkeitstabelle vorkommender Abmessungen .....	224
Tabelle 80: Maschinenfähigkeitswerte .....	225
Tabelle 81: Zeitaufnahme, manueller Prozess .....	226
Tabelle 82: Zeitaufnahme, automatisierter Prozess .....	227
Tabelle 83: Statistische Absicherung manueller Prozess nach REFA .....	228
Tabelle 84: Statistische Absicherung automatisierter Prozess .....	229
Tabelle 85: Messtabelle Versuch Durchflussreduzierung (1) .....	235
Tabelle 86: Messtabelle Versuch Durchflussreduzierung (2) .....	235
Tabelle 87: Wärmeübertragung ins Erdreich, Raumbilanz .....	236
Tabelle 88: Zykluszeiten mit unterschiedlichen Ölen, Auszug .....	238



## Abkürzungsverzeichnis

AFO:	Arbeitsfolgekarte
ASM:	Asynchronmaschine
DMS:	Dehnmessstreifen
ESD:	Electrostatic Discharge (Elektrostatische Entladung)
MTM:	Methods Time Measurement
PLC:	Programmable Logic Controller
RoHS:	Restriction of certain Hazardous Substances
REFA:	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SGM:	Spritzgießmaschine
SPC:	Statistical Process Control
SPS:	Speicherprogrammierbare Steuerung
UAS:	Universelles Analysiersystem

## Literaturverzeichnis

- [1] Al-Haj Mustafa, M., „Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung bei Kunststoffspritzgießen“, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, 2000
- [2] Baehr, H.-D., Kabelac, S., „Stoff- und Wärmeübertragung“, S.4-29, Springer Verlag Berlin-Heidelberg 2008
- [3] Baehr, H.-D., Kabelac, S., „Thermodynamik“, Springer Verlag, S.56-78, Berlin-Heidelberg 2010
- [4] Bender B., „Prozessfähigkeit bei technisch begrenzten Merkmalen, Fähigkeitskennzahlen und Berechnungsmethoden“, Beitrag für Audit-Managementsysteme, Unna 2014
- [5] Bichler, M., „Prozessparameter zur Qualitätssicherung auswählen und bewerten“, Fachbericht, Kunststoffe Heft 84, 1994
- [6] Boss, M., Wodke, T., „Kapillarrheometer perfektioniert Spritzgießprozess“, Fachbericht, Kunststoffe Heft 97, 2007
- [7] Bourdon, R. „Zur Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen“, Dissertation, Technische Fakultät, Universität Erlangen-Nürnberg, 1994
- [8] Bourdon, R., „Vorlesung Kunststofftechnik“, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Hochschule Osnabrück, 2010
- [9] Brunner, K., „Spritzgießmaschinen und Antriebssysteme im Praxisvergleich“, Pöppelmann, Bachelorarbeit, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Hochschule Osnabrück, 2011

- [10] Bürkle, E., Würtele, M., „Plastifizieren in Grenzbereichen“, Fachbericht, Kunststoffe Heft 92, 2002
- [11] Bürkle, E., Würtele, M., Ammer, D., „Spritzgießen in der Medizintechnik“, S.557-594, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 2002
- [12] Dininger, J., „Three Critical Measurements on Injection Molding Process“, Fachbeitrag, Konferenz, Elyria, Ohio USA, 1994
- [13] Dubay, R., Pramujati, B., Hernandez, J., „Cavity Temperature Control in Plastic Injection Molding“, International Conference on Mechatronics & Automation; Niagara Falls, Canada, 2005
- [14] Flosdorff, R., Hilgarth, G., „Elektrische Energieverteilung“, S. 290-310, Teubner Verlag, Stuttgart, 2014
- [15] Fritsche, H., Kolbinger J., Küspert K., Lindenblatt G., „Fachkunde Kunststofftechnik Lernfelder 1 bis 14“, Verlag Europa Lermittel, 2009
- [16] Grewing, M., „Projekt Durchflussreduzierung“, Präsentation, Pöppelmann Lohne, 2016
- [17] Gruber, J. M., „Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeuginnendruck“, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH-Aachen, 2005
- [18] Gründing, L., Völker, M., „Energiepolitik“, firmeninterner Fachbericht, Verfahrensanweisung, Pöppelmann Lohne, 2012
- [19] Haman, S., „Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Spritzgießen“, Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, TU-Chemnitz, Chemnitz, 2004

- [20] Hanke-Bourgeois, M., „Grundlagen der numerischen Mathematik und des wissenschaftlichen Rechnens“, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009
- [21] Häußler, J., „Eine Qualitätssicherungsstrategie für die Kunststoffverarbeitung auf der Basis künstlicher Neuronaler Netzwerke“, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, Düsseldorf, 1995
- [22] Hering, E., „Qualitätsmanagement für Ingenieure“, S.209-235, Springer Verlag, Berlin, 2003
- [23] Hesselbach, J., „Energie und klimateffiziente Produktion“, S.2-280, Springer Verlag 2012
- [24] Hüppe, R., „Sensoreinsatz zur direkten, kontinuierlichen Erfassung und Regelung von Produkteigenschaften beim Spritzgießen“, Dissertation, Fakultät III, Polymertechnik und Polymerphysik, TU-Berlin, 1985
- [25] Jarosch, P., „Zur Lebensdauerprognose zyklisch hoch belasteter Kugelgewindetriebe“, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, 2008
- [26] Johannaber F., Michaeli W., „Handbuch Spritzgießen“, Carl Hanser Verlag München-Wien, 2002
- [27] Kazmer, D., Petrova, T., „Development of a Hybrid Neuronal Network for Quality Control of Injection Molding“, Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Atlanta (GA) USA, 1998
- [28] Kölln, G., „Analyse einer geregelten Wasserverteilung im Hinblick auf die Nutzung zusätzlicher Prozessparameter bei der Herstellung spritzgegossener Kunststoffartikel“, Studienarbeit, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Fachhochschule Osnabrück, 2013

- [29] Kölln, G., „Entwicklung einer standardisierten prozessspezifischen Prüfung des elektrischen Energieverbrauches von Spritzgießmaschinen“, Bachelorarbeit, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Fachhochschule Osnabrück,, 2012
- [30] Kretzschmar, G., „Prozessoptimierung beim Elastomerspritzgießen mittels statistischer Modelle“, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH-Aachen, 1991
- [31] Lampl, A., Gissing, K., Painsith, H. „Kontrolle des Formfüllvorgangs beim Spritzgießen mit Hilfe der Einspritzarbeit“, S. 1105-1108, Fachbericht, Zeitschrift Plastverarbeiter, Heft 10, 1983
- [32] Lemke, H., „Qualitätsabhängige Regelung und Überwachung des Spritzgießprozesses mittels Rechneinsatz“, Dissertation, Fakultät III, Polymertechnik und Polymerphysik, TU-Berlin, 1985
- [33] Liu, J., „Erhöhung der Reproduzierbarkeit des Spritzgießprozesses durch verbesserte Plastifizierkonzepte“, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, 2010
- [34] Matzke, A., „Prozessrechneinsatz beim Spritzgießen - Ein Beitrag zur Erhöhung der Flexibilität in der Fertigung“, Dissertation , Fakultät für Maschinenwesen, RWTH-Aachen, 1985
- [35] Mayer, S., „Gleichmäßige Rohstoffqualität –Voraussetzung für hochwertige Formteile,“ Fachtagung: „Qualitätsoptimierte Spritzgießtechnik“, Fachseminar Süddeutsches Kunststoff Zentrum SKZ Würzburg, 1991
- [36] Michaeli, W., Gruber, J., Schreiber, A., „Automatische Regelung des Betriebspunktes, auf Basis des Werkzeuginnendruckes,“ „Fachbeitrag zum 23. ikv- Kolloquium,“ Aachen, 2006

- [37] Michaeli, W., Mäsing, R., „Vergleich des Betriebsverhaltens elektrohydraulischer und elektrisch-mechanischer Antriebssysteme für Spritzgießmaschinen“, Fachbeitrag zum 24. ikv-Kolloquium, Aachen, 2008
- [38] Menges, G., „Thermisches Verhalten und thermische Auslegung von Spritzgießwerkzeugen“ Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, 1976
- [39] Michaeli, W., Schreiber, A., „Aller guten Dinge sind drei“, Fachbeitrag, Zeitschrift Kunststoffe, 2008/12
- [40] N.N., „Generelles Orbitalmotoren“, Fa. Sauer-Danfoss, Neumünster, 2001
- [41] N.N., „Messtechnik für die Kunststoffverarbeitung“, Fachbericht, Fa. Kistler Instrumente GmbH, Ostfildern, 2009
- [42] N.N., „PP-Informationssystem intern“, Bericht und Lageplan, Pöppelmann, Lohne, 2013
- [43] Neugebauer, R., Handbuch Ressourcenorientierte Produktion, Hanser Verlag, München Wien, 2014
- [44] Ochsner, K., „Wärmepumpen in der Heizungstechnik“, Müller Verlag, 2009
- [45] Plato, R., „Numerische Mathematik“, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000
- [46] Potente, H., „Approximationsgleichungen für Schmelzeextruder“, Rheologica Acta Heft 4, 1983
- [47] REFA, Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, „REFA Methodenlehre der Betriebsorganisation, Datenermittlung“, Carl Hanser Verlag, München, 1997

- [48] REFA, Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, „Arbeitsorganisationen erfolgreicher Unternehmen – Wandel in der Arbeitswelt“, Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [49] Schiffers, R., „Verbesserung der Prozessfähigkeit beim Spritzgießen durch Nutzung von Prozessdaten und eine neuartige Schneckenhubführung“, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, 2009
- [50] Schreiber, A., „Optimierte Prozessführung durch Online-Regelung des Werkzeuginnendrucks“, Beitrag zum Seminar „Qualitätssicherung beim Spritzgießen - Ausschuss senken, Gewinn steigern“, Aachen, 2006
- [51] Schwarz, O., Ebeling, F. W., Furth, B., „Kunststoffverarbeitung“, Vogel Industriemedien, 2005
- [52] Srinivasan, K., Srinivasan, T., Maul, G.P., „Part Weight Control in Thermoplastic Injection Molding Operations“, Society of Plastics Engineers, Annual Technical Conference (ANTEC), Detroit (MI), USA, 1992
- [53] Stitz S., Keller W., „Spritzgießtechnik Verarbeitung - Maschine - Peripherie“, Carl Hanser Verlag, München, 2001
- [54] Stiz, S., „Spritzgießtechnik“, Hanser Verlag München, 2004
- [55] Tänzler, K., „Versteckte Potentiale Erkennen“, Engel Austria GmbH, Präsentation, Schwertberg, Österreich, 2013
- [56] Teigelkötter J., „Effiziente elektrische Antriebe“, S.4-12, Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008

- [57] Vaculik, R. „Regelung der Formteilqualität bei Spritzgießen auf Basis statistischer Prozessmodelle“, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH-Aachen, 1996
- [58] Völker M., Medeweller, J., „ABC Analyse“, Bericht, Pöppelmann Lohne, 2014
- [59] Walter, A., „Methoden des Prozessnahen Qualitätsmanagements in der Kunststoffverarbeitung“, Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, 2000
- [60] Wortberg, J. „Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten,“ Kunststoffe Heft 79, 1989
- [61] Wortberg, J., Schiffers, R., „Entwicklungen bei elektromechanischen Spritzgießmaschinen, Antriebskonzepte–Maschinenfähigkeiten / Prozessfähigkeiten– Prozessdatenanalyse zur Beurteilung von Material-Streuungen“, VDI Jahrestagung Spritzgießen, Baden-Baden, 2008
- [62] Wortberg, J., Jarosch, P. , Kamps, T. „Comparison of drive concepts on injection moulding machines under production conditions“, Society of Plastics Engineers, Annual Technical Conference (Antec-Proceedings), Chicago, USA, 2004
- [63] Wortberg, J., Kamps T., Schiffers R. „Reproduzierbarkeit und Kosten sind Hauptanliegen“, Kunststoffe Heft 93, 2003
- [64] Wortberg, J., Schiffers, R., „Condition monitoring and control for improved process capability in injection moulding“, Polymer Processing Society Jahrestagung, PPS-23 Salvador, Brasilien, 2007
- [65] Wortberg, J., Schiffers, R., Ferriere, C., „Identification of raw material condition by process monitoring and derived control strategies in injection



- moulding“, Polymer Processing Society Jahrestagung, PPS-24 Salerno, Italien, 2008
- [66] Würtele, M., Lang, Ch., Hungerkamp, T., „Plastifizieren in kürzester Zeit“, Fachbericht, Kunststoffe Heft 6, 2004
- [67] Zahoransky R., Bollin E., Schwarz, H., „Energietechnik – Systeme zur Energieumwandlung“, S.5-7, Springer-Vieweg Wiesbaden, 2013
- [68] Zöllner O., „Optimierte Werkzeugtemperierung“, Forschungsbericht, Bayer AG, 1999

## Internetquellen

- [69] Arburg „320M 850-210 Hydraulikplan“, Arburg GmbH & Co. KG, Loßburg, 1995, <http://www.arburg.com> [Juli 2016]
- [70] Carl, M., „Energie und Rohstoffe – Umlagen und Aufschläge minimieren“, Fachbericht, IHK Detmold, 2015 <https://www.detmold.ihk.de/de/innovation-und-umwelt/energie/energiekosten-senken> [Jan 2016]
- [71] Doppelbauer, M., „Wirkungsgradklassen gemäß IEC 60034-30“, Fachbericht, <http://www.elektroniknet.de/typo3temp/pics/20b4dafda6.jpg> [Jan 2016]
- [72] Eisenegger, K., „Six Sigma Yellow Belt Prozessfähigkeit“, S.34, Verlag und Druck epubli München 2011, [http://www.sixsigma.ch/index\\_htm\\_files/E-BookYellowBeltProzessfaehigkeit.pdf](http://www.sixsigma.ch/index_htm_files/E-BookYellowBeltProzessfaehigkeit.pdf) [Jan 2016]
- [73] Heinrich, C., Witting, S., Albering, P., „Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie“, Fachbericht, Umweltbundesamt Dessau, 2014, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikati>

onen/climate\_change\_25\_2014\_nachhaltige\_kaelteversorgung\_in\_deutschland\_1.pdf [Juni 2016]

- [74] Kahlenborn, W., Kabisch S., Klein J., Richter I., Schürmann S., „Energiemanagementsysteme in der Praxis, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit“, Referat Öffentlichkeitsarbeit, Berlin 2012 <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3959.pdf> [Juli 2016]
- [75] Klähn, G., „Grundlagen der Elektrotechnik, Energiebetrachtungen im elektrischen Stromkreis“, Fachbeitrag, Hannover 2014, [http://www.bildung-niedersachsen.de/elektrotechnik/e\\_grundlagen\\_kap\\_06\\_4v4.html](http://www.bildung-niedersachsen.de/elektrotechnik/e_grundlagen_kap_06_4v4.html) [Nov 2014]
- [76] Klotz, K., „Abwärme bei Kompressoren nutzen“, Fachbericht, Energiekompendium 2012, <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=167124> [Nov 2014]
- [77] Litpher M., „Was ist Blindleistung“, Fachbericht, Lech Werke AG, Augsburg 2009 [http://www.lew.de/CLP/downloads/Produktinfos/ERS\\_G\\_S\\_Blindleistung.pdf](http://www.lew.de/CLP/downloads/Produktinfos/ERS_G_S_Blindleistung.pdf) [Dez 2014]
- [78] N.N. „Dasylab“, Fachbeitrag, ACCD Hightech Solutions, 2014, <http://www.acceed.com/images/dasylab.gif> [Juni 2015]
- [79] N.N. „Druckluft Effizient, Fakten zur Druckluft“, Veröffentlichung des Fraunhofer ISI, Deutsche Energieagentur, Karlsruhe, 2003, <http://www.druckluft-effizient.de/downloads/fakten/fakten-00-09.pdf> [Juni 2015]

- [80] N.N. „Energieeffizienz im Unternehmen“, Fachbericht, Energieagentur NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de/haushalt/kaelteanlagen-3911.asp> [Juli 2014]
- [81] N.N. „Energieeffizienz im Unternehmen, Optimierung der Abnahmeverhältnisse – Leistungskomponente – Lastganganalyse“, Fachbericht, Energieagentur NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de/unternehmen/optimierung-der-abnahmeverhaeltnisse-leistungskomponente-lastganganalyse--3954>. [Juli 2014]
- [82] N.N. „Energieeffizienz im Unternehmen“, Fachbericht, Energieagentur NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de/unternehmen/druckluft-3907.asp> [Jan 2016]
- [83] N.N. „Virtuelles Unternehmen“, Fachbeitrag, Energieagentur NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de/online-tools/virtuelles-unternehmen-13400.asp> [Jan 2016]
- [84] N.N. „ESD electronic discharge“, Fachbeitrag, Unifur Industriebedarf, [http://www.unifur.de/lexikon/esd---electrostatic-discharge\\_\\_24.htm](http://www.unifur.de/lexikon/esd---electrostatic-discharge__24.htm) [Dez 2008]
- [85] N.N., „HB-Therm Temperiertechnik“, Fachbeitrag, [http://www.hb-therm.de/hosting/Gabag/HB-Therm.nsf/vwRes/D8095-D%7Cde/\\$FILE/D8095-D.pdf](http://www.hb-therm.de/hosting/Gabag/HB-Therm.nsf/vwRes/D8095-D%7Cde/$FILE/D8095-D.pdf) [Nov 2015]
- [86] N. N. „Interpolation“, Veröffentlichung Beuth - Hochschule für Technik Berlin, <http://public.beuth-hochschule.de/~marganit/Interpolation.pdf> [Juni 2015]
- [87] N.N. „Luftabscheidevermögen“, Fachbericht, Oelcheck GmbH, <https://www.oelcheck.de/wissen-von-a-z/komplexe->

- begriffe/luftabscheidevermoegen-schaumverhalten-oelchecker-fruehjahr-2002.html [Dez 2016]
- [88] N.N. „Mechanismen der Wärmeübertragung“, Multimedia Technikum Weimar und Ilmenau, 2003, [http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwtd/m2twin/ifass\\_04\\_01.htm](http://www.maschinenbau.tu-ilmenau.de/mb/wwwtd/m2twin/ifass_04_01.htm) [Dez 2015]
- [89] N. N. „Numerische Integration“, Veröffentlichung, Ruprecht-Karls-Universität Heideberg, <https://www.mathi.uni-heidelberg.de/~thaeter/anasem08/Isenhardt.pdf> [März 2015]
- [90] N.N. „Produkte Dasylab – Quantumix-Treiber“, Fachbericht, IMP, [http://www.impkoeln.de/produkte\\_quantumx.html](http://www.impkoeln.de/produkte_quantumx.html) [Juni 2016]
- [91] N. N. „Spritzgießen von Qualitätsformteilen“ Fachbericht, Covestro Deutschland AG, Leverkusen 2016, [http://www.plastics.covestro.com/zh-CN/Technologies/Processing/~/\\_media/F88793A546DC4BC68B58478161F1A619.ashx?la=de](http://www.plastics.covestro.com/zh-CN/Technologies/Processing/~/_media/F88793A546DC4BC68B58478161F1A619.ashx?la=de) [Juni 2016]
- [92] N.N. „Wärmerückgewinnung“, Fachbericht, Boge Kompressoren GmbH, Bielefeld 2012  
[http://www.drucklufttechnik.de/www/temp/Dlrepos.nsf/LookupHTML/KompendumPDF\\_d/\\$File/Kapitel11.pdf](http://www.drucklufttechnik.de/www/temp/Dlrepos.nsf/LookupHTML/KompendumPDF_d/$File/Kapitel11.pdf) [Jan 2016]
- [93] N.N. „Wärmestrahlung“, Fachbeitrag, SOLIDWORKS 2011  
[http://help.solidworks.com/2011/german/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Radiation\\_Topics/IDH\\_Analysis\\_Background\\_Radiation.html](http://help.solidworks.com/2011/german/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/AnalysisBackground/ThermalAnalysis/Radiation_Topics/IDH_Analysis_Background_Radiation.html) [Juli 2016]
- [94] Pötz P., Eichhammer W., „Zukunftsmarkt „Effiziente Elektromotoren“, Veröffentlichung, Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung,

- Karlsruhe, 2011 [http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fallstudie\\_Elektromotoren.pdf](http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/Fallstudie_Elektromotoren.pdf) [Juli 2016]
- [95] Rennspieß, W., Schlicht, R., Theiß, E., „Wärmerückgewinnung in Lüftungsanlagen“, Fachbeitrag, Stiebel Eltron GmbH, Holzminden 2014, [http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Gebaeudetechnik-Waermerueckgewinnung-in-Lueftungsanlagen\\_2468659.html](http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Gebaeudetechnik-Waermerueckgewinnung-in-Lueftungsanlagen_2468659.html) [Juli 2016]
- [96] Schleith, M., „Anwendungsmöglichkeiten für Absorptionskältemaschinen und Wärmepumpen“, Fachbeitrag, CCI Dialog GmbH, 2013, [http://www.cci-dialog.de/wissensportal/technikwissen/kaeltetechnik/anwendungsmoeglichkeiten\\_fuer\\_absorptionskaeltemaschinen\\_und\\_waermepumpen.html?page=5&buyBackLink=/wissensportal/technikwissen/kaeltetechnik/anwendungsmoeglichkeiten\\_fuer\\_absorptionskaeltemaschinen\\_und\\_waermepumpen.html&buyBackPage=4](http://www.cci-dialog.de/wissensportal/technikwissen/kaeltetechnik/anwendungsmoeglichkeiten_fuer_absorptionskaeltemaschinen_und_waermepumpen.html?page=5&buyBackLink=/wissensportal/technikwissen/kaeltetechnik/anwendungsmoeglichkeiten_fuer_absorptionskaeltemaschinen_und_waermepumpen.html&buyBackPage=4)
- [97] Schwandt T., „Das kubische Spline-Verfahren“, Veröffentlichung der Fachhochschule Erfurt 2012, [http://students.zebresel.com/wp-content/uploads/2012/07/ModMA\\_SoSe12\\_Tobias\\_Schwandt.pdf](http://students.zebresel.com/wp-content/uploads/2012/07/ModMA_SoSe12_Tobias_Schwandt.pdf) [Juli 2016]
- [98] Weidner, W., „Airleader Kompressoren Management“, Fachbericht, Airleader WF Steuerungstechnik GmbH, Vahingen Enz, 2014, [http://www.airleader.de/prospekte/Airleader\\_master\\_de.pdf](http://www.airleader.de/prospekte/Airleader_master_de.pdf) [Juli 2016]
- [99] Zumschlinge, B., Müller, J., „Energiemanagement“, Fachbericht, Management Systeme GmbH, Landsberg Lech 2014, <http://www.thema-management.de/energiemanagement.html> [Juli 2016]
- [100] Zaluski, Ch., „Ökostrom oder Atomstrom“, Fachbeitrag, Zeit Online, <http://www.zeit.de/online/2006/02/oekostrom> [Jan 2014]